République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université 8 Mai 1945 Guelma

جامعة 8 ماي 1945 قالمة
UNIVERSITE 8 MAI 1945 GUELMA

Faculté Sciences et de la Technologie

Département Génie Mécanique

Laboratoire de domiciliation : Laboratoire de Mécanique Appliquée des Nouveaux Matériaux

THÈSE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE

DOCTORATEN 3ème CYCLE

Domaine : Sciences et Technologies. Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Génie Mécanique et Matériaux Avancées

Présentée par

RAMDANI Hamza

Intitulée

Modélisation des Performances d'un Capteur Hybride Photovoltaïque/Thermique à Base d'un Nanofluide TiO_2

Soutenue le : 23 mars 2022 Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom	**Grade**		
Mr. BEZAZI Abderrezak	**Professeur**	Université 8 mai 1945-Guelma	Président
Mr. OULD-LAHOUCINE Cherif	**Professeur**	Université 8 mai 1945-Guelma	Encadreur
Mr. HADDAD Abdelkrim	**Professeur**	Université 8 mai 1945-Guelma	Examinateur
Mr. KHELLAF Abdallah	**Directeur de Recherches**	CDER Bouzaréah, Alger	Examinateur
Mr. GUENFOUD Salah	**Professeur**	Université 8 mai 1945-Guelma	Examinateur

Année Universitaire : 2021/2022

Dédicace

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance. Aussi, c'est tout simplement que je dédie ce modeste travail à :

- A mes parents pour tous les soutiens qu'ils m'ont apportés, malgré les situations difficiles que nous traversons, qu'ils soient bénis à jamais.
- A ma petite famille, ma chère épouse et ma petite princesse Farah et mon prince Djibril
- A mes sœurs et mes frères, leur présence à mes côtés.
- A tous mes amis qui m'ont encouragé dans les moments difficiles
- A mes amis, à tous les membres du laboratoire de Mécanique Appliquée des Nouveaux Matériaux (LMANM), et à ceux qui sont proches de mon cœur.
- A tous ceux qui de près ou de loin m'ont soutenu

RAMDANI Hamza.

Remerciement

Tout est bien, qui finit bien. Dieu merci !!!

*Je commencerai évidemment par présenter mon immense gratitude et mes remerciements les plus sincères à M. le Professeur **OULD-LAHOUCINE Cherif** pour son soutien indéfectible et sa présence attentionnée durant tous les moments difficiles qui ont marqué cette longue période d'encadrement et de la vie…*

*Mes remerciements vont aussi A. M. le Professeur **BEZAZI Abderrezak**, directeur de Laboratoire de Mécanique Appliquée des Nouveaux Matériaux **(LMANM)** pour m'avoir honoré de par sa présence en présidant le jury de soutenance de mon Doctorat.*

*Aux membres du jury qui ont accepté d'examiner et scruter le contenu de ma thèse de Doctorat; mes remerciements les plus sincères au Professeur **Haddad Abdelkrim** du département de génie mécanique (Université 8 Mai 1945 Guelma), à **Mr. Khellaf Abdallah**, Directeur de Recherches au centre de développement des énergies renouvelables (CDRE, Bouzaréah, Alger), ainsi qu'au Prof. **Guenfoud Salah** du département de génie mécanique (Université 8 Mai 1945 Guelma). Je n'oublierai certainement pas le Professeur*

***ZANAT Kamel** pour son immense disponibilité, son captivant esprit scientifique et son attachante et réjouissante vitalité.*

*Au Professeur. **ZIAD Driss**, pour avoir accepté de m'accueillir au sein du Laboratoire de Système Electromécanique (LASEM) aux facultés universitaire de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs à Sfax (ENIS) et éclairé continuellement (avec toute l'équipe du LASEM. **NASRAOUI Haithem**, **BAKLOUTI Ismail**) les longues journées par sa convivialité aussi bien personnelle que scientifique.*

***Sans oublier** ☺*

*M. **TRIKI Saif-eddine** pour son aide et soutien le long de la rédaction de la thèse du doctorat.*

***Ma petite et précieuse famille** ma chère épouse qui veut faire de moi un homme exceptionnellement exceptionnel et mes petits-enfants **Farah et Djibril** À qui je souhaite une vie pleine de bonheur, de santé et de réussite.*

***Les membres de ma famille** [mon père, ma maman, mes frères, mes belles sœurs, les nièces et neveux] qui m'ont toujours marqué leur soutien.*
La famille DJERIBI,

***Mes amis:** HADDAD Taki-eddine, HASROUF Khalid, SAHNOUN Hichem, GHAFJAT Abbes, REGHAISSIA Imad et tous mes amis*

Résumé de la thèse :

Dans la présente thèse de doctorat, des analyses énergétiques et exergétiques sont proposées pour deux collecteurs solaire hybrides photovoltaïque/thermique dits (PV/T), l'un utilisant l'eau et l'autre un nanofluide eau-TiO_2, respectivement. Pour le cas du (PV/T) à base d'eau, une nouvelle conception est proposée; elle concerne l'écoulement de l'eau au-dessus des cellules photovoltaïques. L'eau servira à refroidir les cellules PV et également à filtrer le rayonnement solaire incident. Etant un filtre naturel, elle absorbera les rayonnements infra-rouge (IR), par conséquent, elle recueillera l'énergie thermique, en plus du fait qu'elle laissera passer le rayonnement visible, qui en atteignant les cellules photovoltaïques (PV), génèrera de l'électricité. Pour le collecteur (PV/T) à base de nanofluide, le canal est posé en-dessous du PV. Les deux types de (PV/T) sont modélisés et simulés numériquement à l'aide du logiciel ANSYS Fluent. Les simulations portent sur les impacts des paramètres intrinsèques (la hauteur du canal de refroidissement et la vitesse d'entrée de l'eau) et extrinsèques (la vitesse du vent, irradiation solaire et température ambiante) sur les performances énergétiques et exergétiques globales des PVT. Les résultats montrent qu'en termes de quantité et de qualité d'énergie, le nouveau PVT à eau est supérieur à ceux proposés précédemment du type plaque et tubes (S&T). Pour le (PV/T) à base du nanofluide eau-TiO_2, il ne présente qu'un faible avantage en terme d'efficacité énergétique par rapport au (PV/T) à base d'eau (PV/T). Du point de vue exergétique, en revanche, le (PV/T) à base d'eau est meilleur (même comparé au nanofluide avec une fraction massique élevée de l'ordre de 4,127%). En outre, une nouvelle méthode de détermination de la hauteur optimale du canal de refroidissement de section droite rectangulaire est également proposée et validée.

Mots clés

Collecteur hybride photovoltaïque/thermique, nanofluide eau-TiO_2, analyse énergétique, analyse exergétique, optimisation.

Abstract of the thesis:

In this, doctoral thesis, energy and exergy analyses are proposed for two so-called hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) solar collectors; one using water and the other a water-TiO_2 nanofluid, respectively. For the case of water-based (PV/T), a new design is proposed. The novelty concerns the flow of water over photovoltaic cells; it will be used to cool the PV cells and to filter the incident solar radiation. Water as a natural filter will absorb IR radiations; therefore, it collects thermal energy, and let visible radiation pass, reaches the PV, and generate electricity. For the nanofluid-based collector (PV/T), the channel is placed below the PV. The two hybrid collectors are modeled and numerically simulated using ANSYS Fluent software.The simulations focus on the impacts of the intrinsic (the height of the cooling channel and the water inlet velocity) and extrinsic (wind velocity, solar irradiation, and ambient temperature) parameters on the overall energy and exergy performances of PVTs. The results show that in terms of *'quantity and quality'* of energy, the new water-based (PV/T) is superior to those proposed previously (sheet and tubes type or S&T). Besides, the water-TiO_2 nanofluid-based (PV/T) presents no substantial advantage over the water-based (PV/T). From an exergy point of view, on the other hand, the water-based (PV/T) is better (even compared to the nanofluid with a high mass fraction of 4.127%). In addition, a new method for determining the optimal height of the rectangular channel is also proposed and validated.

Key words

Hybrid photovoltaic/thermal collector, water-TiO_2 nanofluid, energy analysis, exergy analysis, optimization.

ملخص الرسالة:

في أطروحة الدكتوراه هذه ، تم اقتراح تحليلات الطاقة والطاقة الخارجة لما يسمى مجمعات الطاقة الشمسية الهجينة الكهروضوئية / الحرارية (PV/T) ، أحدهما يستخدم الماء والآخر يستخدم الماءTiO_2 - نانوفولويد ، على التوالي. بالنسبة لحالة الماء (PV/T) ، تم اقتراح تصميم جديد ونمذجة ومحاكاة رقم33

يأً باستخدام برنامج ANSYS Fluent. تتعلق الحداثة بتدفق الماء فوق الخلايا الكهروضوئية ؛ ؛ سيتم استخدامه لتبريد الخلايا الكهروضوئية وأيضًا لتصفية الإشعاع الشمسي الساقط. سوف يمتص الماء كمرشح طبيعي إشعاعات الأشعة تحت الحمراء ، وبالتالي فهو يجمع الطاقة الحرارية ، بالإضافة إلى أنه سيمرر الإشعاع المرئي الذي يصل إلى الكهروضوئية ويولد الكهرباء. بالنسبة للمجمع القائم على الموائع النانوية (PV/T) ، يتم وضع القناة أسفل الكهروضوئية. تركز عمليات المحاكاة على تأثيرات المعلمات الجوهرية (ارتفاع قناة التبريد وسرعة مدخل المياه) والخارجية (سرعة الرياح ، والإشعاع الشمسي ، ودرجة الحرارة المحيطة) على الطاقة الإجمالية وأداء الطاقة من .PVTs تظهر النتائج أنه من حيث كمية ونوعية الطاقة ، فإن PVT الجديد القائم على الماء يتفوق على تلك المقترحة سابقًا. بالنسبة إلى الماءTiO_2 - ذو الأساس النانوي (PV/T) ، لديه فقط ميزة كفاءة طاقة منخفضة على الماء .(PV/T) (PV/T) من وجهة نظر exergy، من ناحية أخرى ، فإن الماء (PV/T) أفضل (حتى بالمقارنة مع المائع النانوي الذي يحتوي على نسبة عالية من الكتلة تبلغ 4.127٪). بالإضافة إلى ذلك ، تم اقتراح طريقة جديدة لتحديد الارتفاع الأمثل لمستطيل القناة والتحقق من صحتها.

الكلمات الدالة:

المجمعالهجين الكهروضوئي / الحراري ، السائل النانوي المائي TiO2 ، تحليل الطاقة ، التحسين.

Liste des Figures

Chapitre I

Chapitre II

Chapitre III

Chapitre IV

Chapitre V

Chapitre VI

Chapitre VII

Chapitre VIII

Liste des Tableaux

Chapitre III

Chapitre V

Chapitre VI

Chapitre VII

Table des Matières

Symboles

A_c	Surface du PV cell (m^2)
A_{fc}	Section transversale du canal d'écoulement d'entrée (m^2)
C_p	Capacité calorifique spécifique à pression constante($J\ kg^{-1}K^{-1}$)
C_{pw}	Capacité calorifique spécifique de l'eau($J\ kg^{-1}K^{-1}$)
D_I	Diamètre intérieur(m)
E_c	Énergie solaire totale dans la cellule(W)
E_{el}	Énergie électrique(W)
E_{th}	Énergie thermique extraite par l'eau(W)
F	Force de Volume force (N)
h_c	Coefficient de transfert de chaleur (W $m^{-2}K^{-1}$)
h_T	Coefficient de transfert de chaleur conducteur de la cellule solaire à l'eau à travers le tedlar (W $m^{-2}K^{-1}$)
I	Moment d'inertie (kg $.m^2$)
I_{mp}	Courant de point de puissance maximal (A)
k	Conductivité thermique du matériau (W $m^{-1}K^{-1}$)
k_w	Conductivité thermique de l'eau (W $m^{-1}K^{-1}$)
m	Débit massique (m^3h^{-1})

Symboles

n	normale à la surface
P	Pression (Pa)
P_c	Facteur d’empilement
Q	Production totale de chaleur(W)
Q_c	Perte de chaleur par convection $(\mathrm{W}\,m^{-2})$
q	Flux de chaleur vers l'intérieur (W)
R	Rayonnement solaire (W/m^2)
R_e	Nombre de Reynolds
t	Temps (S)
T_{amb}	Température Ambiante $(\mathrm{C}°/\mathrm{K})$
T_b	Température de la surface arrière$(\mathrm{C}°/\mathrm{K})$
T_{cell}	Température de PV cell $(\mathrm{C}°/\mathrm{K})$
T_{in}	Température d’entrée de l’eau $(\mathrm{C}°/\mathrm{K})$
T_{out}	Température de sortie de l’eau $(\mathrm{C}°/\mathrm{K})$
T_{ref}	Température de référence$(\mathrm{C}°/\mathrm{K})$
U	Champ de vitesse (m/S)
V_{in}	Vitesse de l'eau d'entrée (m/S)
V	Vitesse de vent (m/S)

Symboles

V_{mp} Tension maximale du point de puissance

Δ Opérateur différentiel vectoriel

β Coefficient de température à la température de la cellule de référence

µ Viscosité dynamique du fluide$(m^2 S^{-1})$

ν Viscosité cinématique du fluide$(m^2 S^{-1})$

ρ Densité du fluide (Kg/m^3)

η_{ref} Rendement électrique des cellules PV à température de référence

η_{th} Efficacité thermique

η_{el} Efficacité électrique

η_{tot} Efficacité totale du système PV/T

τ_g Emissivité du verre

α_c Absorptivité de la cellule PV

α_T Absorptivité de tedlar

nf_{nf} Signification de nanofluide

INTRODUCTION GÉNÉRAL

1 Introduction

L'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables (EnR) et d'efficacité énergétique. Cette vision du gouvernement algérien s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain.

Le programme des énergies renouvelables actualisé consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national.

A travers ce programme d'énergies renouvelables, l'Algérie compte se positionner comme un acteur majeur dans la production de l'électricité à partir des filières photovoltaïque et éolienne en intégrant la biomasse, la cogénération, la géothermie et au-delà de 2021, le solaire thermique. Ces filières énergétiques seront les moteurs d'un développement économique durable à même d'impulser un nouveau modèle de croissance économique.

Le potentiel national en énergies renouvelables étant fortement dominé par le solaire, l'Algérie considère cette énergie comme une opportunité et un levier de développement économique et social, notamment à travers l'implantation d'industries créatrices de richesse et d'emplois.

Le programme d'efficacité énergétique actualisé vise à réaliser des économies d'énergies à l'horizon 2030 de l'ordre de 63 millions de TEP (tonnes équivalent de pétrole), pour l'ensemble des secteurs (bâtiment et éclairage publique, transport, industrie) et ce, en introduisant l'éclairage performant, l'isolation thermique et les chauffe-eau solaires, les carburants propres (GPLc et GNc), et les équipements industriels performants. Le programme de l'efficacité énergétique permettra en outre de réduire les émissions de CO_2 de 193 millions de tonne

Le programme d'efficacité énergétique pour le secteur bâtimentvise à encourager la mise en œuvre de pratiques et de technologies innovantes, autour de l'isolation thermique des constructions existantes et nouvelles. Il s'agit également de favoriser la pénétration massive des équipements et appareils performants sur le marché local, notamment les chauffe-eau solaires.La mise en place d'une industrie locale des isolants thermiques et des équipements et appareils performants (chauffe-eau solaires; lampes économiques) constitue l'un des atouts pour le développement de l'efficacité énergétique dans ce secteur.

Cependant, trois défis majeurs font face à la réalisation effective de ce programme ambitieux, ce sont :

1) L'Algérie se trouve au nord du continent Africain, et est de fait du point de vue climatique un pays chaud; les températures en été peuvent atteindre et dépassent même dans certains cas les 45 °C.

2) la faiblesse du secteur industriel type PME-PMI, et enfin

3) la quasi-inexistence d'une collaboration effective entre l'université/centres de recherche et le milieu économique.

Pour ce qui concerne le premier point, la chaleur ainsi que la poussière sont responsables de la faiblesse du rendement de conversion des panneaux photovoltaïques. Le rendement d'une cellule PV comme tout système de conversion thermodynamique, diminue suite aux irréversibilités de l'entropie produite avec l'augmentation de la température. Le refroidissement des cellules PV constitue un des axes de recherche actuellement en vogue un peu partout dans le monde, mais aussi depuis quelques années à l'université du 8 Mai 1945 de Guelma. Dans un souci d'efficacité énergétique, une solution à ce problème de refroidissement du PV consiste à utiliser un collecteur dit hybride combinant à la fois un panneau photovoltaïque produisant de l'électricité mais aussi un collecteur thermodynamique (ou thermique) produisant de la chaleur ou l'eau chaude. En refroidissant le PV, en améliorant ainsi son rendement, de la chaleur sera donc extraite par le fluide caloporteur qui peut être soit de l'eau, l'air, ou un nanofluide et pourra à son tour être utilisée pour des applications domestiques (eau chaude sanitaire) ou même industrielles (chauffage ou séchage de produits agricoles entre autres). Ce collecteur hybride, est donc une solution attractive mais qui requiert, cependant, beaucoup de savoir-faire scientifique et technique. La construction des collecteurs hybrides dans notre pays permettra ainsi l'émergence d'une industrie PME-PMI accompagnant le développement des énergies renouvelables et l'efficacité énergétique en Algérie et participera à relever le second défit su-énumérer. Pour ce qui concerne, le troisième défit qui est la collaboration entre l'université et le secteur industriel, sa solution étant complexe, et de plus, multisectorielle. Il ne ressort pas moins que si les mémoires de master et thèses de doctorat s'attaquent dans leur majorité à des sujets de recherche-développement comme c'est le cas dans les pays développés (Japon par exemple), les résultats de la recherche vont pour certains, aboutir à des brevets d'inventions et des prototypes qui seront bénéfiques pour le secteur économique.

Ce travail de doctorat a donc été défini avec comme objectifs :

- De proposer, modéliser et simuler un nouveau capteur solaire hybride photovoltaïque/thermique dit (PV/T) à base d'eau utilisant un seul canal de refroidissement au lieu du type généralement utilisé dit à plaque et tube (sheet and tube). Le canal de refroidissement est constitué de deux plaques en verre placées au-dessus du PV. Cette innovation a été inspirée par l'observation de l'absorption du rayonnement électromagnétique du soleil par de l'eau et les cellules photovoltaïques. L'eau absorbe le rayonnement infrarouge et laisse passer la partie visible du spectre. La cellule PV absorbe quant à elle le visible pour générer de l'électricité. Ainsi en plaçant une couche d'eau au-dessus des cellules PV, le rayonnement infrarouge sera absorbé dans une large partie, l'eau chauffera en laissant passer le rayonnement visible vers le PV. C'est la solution proposée pour répondre au défit de l'installation du PV dans les zones chaudes en Algérie ou ailleurs.

- De modéliser et simuler un autre collecteur solaire hybride (PV/T) avec canal utilisant un nanofluide eau-TiO_2. Cette étude vise aussi à mettre la lumière sur '*la supposée supérioritéénergétique*' des systèmes utilisant les nanofluides comme fluides de refroidissement par rapport aux systèmes utilisant de l'eau.

•D'étudier du point de vue énergétique (*quantitatif*) et exergétique (*qualitatif*) les rendements des collecteurs hybrides proposés et les comparer à ceux des (PV/T) dits à plaque et tubes (sheet and tubes).

•D'aborder un sujet scientifique complexe et de relever le défit de réaliser une thèse de doctorat de niveau aussi proche que possible que celles soutenues dans des pays et laboratoires beaucoup plus développé que le nôtre.

L'organisation de la présente thèse de doctorat s'articule sur huit chapitres, dont le second est un état de l'art sur l'énergie solaire et ses différentes applications, le capteur photovoltaïque et sa conversion, le capteur thermodynamique et enfin les collecteurs hybrides photovoltaïque/thermique appelés (PV/T). Dans ce chapitre aussi, une explication détaillée sur l'absorption spectrale du rayonnement solaire par l'eau est présentée; on expliquera comment que le rayonnement infrarouge est absorbé alors que la partie visible passe à travers l'eau qui joue ainsi le rôle d'un filtre naturel au rayonnement solaire incident. Le spectre d'absorption du rayonnement solaire par une cellule photovoltaïque est aussi présenté et expliqué. La compréhension de ces deux phénomènes d'absorption (eau et PV) a donc permis de proposer un nouveau collecteur hybride (PV/T) pour l'eau qui sera présenté à la fin du chapitre. Le troisième chapitre est une analyse énergétique et une autre exergétique d'un collecteur hybride (PV/T), avec présentation des équations de calculs des rendements énergétique et exergétique pour les deux types d'énergies; thermique et électrique, respectivement. C'est dans le chapitre 4 que la modélisation numérique du nouveau collecteur hybride (PV/T) à base d'eau est proposée. La simulation est faite grâce à ANSYS Fluent. Dans le chapitre cinq, les résultats des simulations numériques du capteur hybride (PV/T) à base d'eau sont présentés. Beaucoup de résultats sont présentés avec des explications ainsi que des études paramétriques avec entre autres: l'effet de la température ambiante et la vitesse du vent, de la température d'entrée de l'eau, la hauteur du canal de refroidissement et le rayonnement solaire incident. Le chapitre six commence par un état de l'art très détaillé sur les nanofluides, leurs préparations, propriétés thermophysiques (conductivité thermique, chaleur spécifique, masse volumique, viscosité dynamique) et leurs différentes applications dans le domaine de l'énergie. Puisque le nanofluide choisi dans les travaux de cette thèse est eau-TiO_2, un état de l'art très détaillé sur ce nanofluide lui sera consacré. Il a permis de comprendre les propriétés de ce nanofluide, parmi lesquelles les formes géométriques des nanoparticules obtenues par différentes méthodes de synthèses et visualisation grâce au SEM et TEM, les problèmes d'agglomérations et sédimentations. Une partie importante du chapitre sera consacrée aux différentes équations utilisées dans la littérature pour les calculs des conductivités thermiques, viscosités dynamiques, et masse volumiques effectives du nanofluide eau-TiO_2. La connaissance exacte des valeurs de ces propriétés pour différentes températures et concentrations volumiques des nanoparticules est très importante afin d'éviter les erreurs systématiques des calculs numériques dues aux entrées erronées. Justement, c'est dans le chapitre sept que la simulation numérique du capteur hybride (PV/T) à base de nanofluide eau-TiO_2 sera faite en utilisant comme données thermophysiques d'entrée non pas des valeurs calculées par les différentes corrélations existantes, mais plutôt par des équations des lissages des données expérimentales des mesures de ces propriétés par certains auteurs. En outre, dans cette thèse de doctorat, deux corrélations très importantes, l'une pour la conductivité thermique effective et l'autre pour la viscosité dynamique effective du

nanofluide eau-TiO_2sont proposées. L'avant dernière partie du chapitre est consacré aux simulations numériques en utilisant le code de calcul ANSYS Fluent. Toutes les hypothèses simplificatrices adoptées et les équations gouvernantes avec les conditions aux limites sont présentées et leurs utilisations justifiées. Enfin, les analyses énergétiques et exergétiques du (PV/T) avec les équations correspondantes pour le cas d'étude d'un (PV/T) avec canal placé en dessous du PV constituent la dernière partie du chapitre. Le chapitre sept présente les résultats des simulations avec des discussions. De la même manière que pour le (PV/T) à base d'eau, dans ce cas aussi, une étude paramétrique des effets des paramètres intrinsèques et extrinsèques sur les performances énergétiques et exergétiques est faite. Dans le dernier chapitre de cette thèse de doctorat (chapitre huit), et en se basant sur les rendements énergétiques et exergétiques, une nouvelle méthode de détermination de la hauteur optimale du canal de refroidissement de section droite rectangulaire est présentée. En effet, il s'avère que les variations du rendement énergétique (η) et du rendement exergétique (ε) du (PV/T) en fonction de la hauteur H du canal de refroidissement présentent une sorte '*d'effet concurrent ou en compétition*'. Ceci veut dire, qu'une hauteur optimale du canal est à déterminer. La validation est faite par comparaison avec l'équation d'Adrian Bejan. Une conclusion générale avec les constatations les plus pertinentes constitue la dernière partie de ce travail de thèse.

CHAPITRE I

ETAT DE L'ART

Introduction :

Le collecteur hybride photovoltaïque/thermique (PV/T) est une technologie relativement naissante. De nombreux aspects concernant le PV/T sont encore en cours de recherche et de développement. Dans le présent chapitre, nous avons tenté de présenter un aperçu détaillé de la technologie PV/T ainsi que leur développement historique, leurs types, leurs performances et leurs approches pour une amélioration ultérieure de ces systèmes. Bien que l'examen se concentre principalement sur les différents types et conceptions de capteurs thermiques, les paramètres affectant les performances PV/T tels que le débit massique, la température (ambiante, fluide et cellule), le facteur de garnissage, le matériau de la cellule, le matériau de la plaque absorbante, le vitrage, etc. sont également largement discutés. Les sources de la revue de la littérature sont des articles publiés dans des revues réputées, des sites Web et des communications.

1.1. La Conversion Photovoltaïque :

L'énergie solaire est l'une des ressources énergétiques futures les plus prometteuses. La conversion directe de la lumière du soleil en énergie électrique par les cellules solaires est d'un intérêt particulier car elle présente de nombreux avantages par rapport aux méthodes de production d'énergie électrique les plus couramment utilisées. L'électricité est produite sans évacuation des gaz à effet de serre et sans sous-produits des déchets nucléaires.
La cellule solaire colorée (The dye-sensitized solar cell : DSSC) semble avoir un potentiel important en tant qu'alternative à faible coût aux cellules solaires à jonction p-n conventionnelles. Un DSSC consiste en un réseau nanocristallin mésoporeux d'un semi-conducteur à large bande interdite (généralement TiO2), qui est recouvert d'une monocouche de molécules de colorant (généralement un colorant Ru). Le semi-conducteur est déposé sur une électrode d'oxyde conducteur transparent (TCO), à travers laquelle la cellule est éclairée. Les pores de TiO2 sont remplis d'un électrolyte redox (I- / I3-) qui agit comme un conducteur et qui est électriquement connecté à une électrode en platine. Lors de l'illumination, des électrons sont injectés du colorant photo-excité dans le semi-conducteur et se déplacent vers le substrat TCO, tandis que l'électrolyte réduit le colorant oxydé et transporte les charges positives vers l'électrode Pt. De tels systèmes peuvent atteindre des rendements de conversion solaire-électrique d'environ 10% 1 mais ne sont toujours pas produits à grande échelle principalement en raison de problèmes techniques tels que l'étanchéité.

À l'heure actuelle, les cellules solaires à jonction p-n sont les dispositifs de conversion d'énergie lumière-électrique les plus efficaces, et elles sont produites en quantités beaucoup plus importantes que tout autre type de cellule solaire. Dans une cellule solaire à jonction pn, la différence de fonction de travail entre le matériau p et n conduit à une variation spatiale des énergies de bande (reflétée dans la « flexion » des bandes de conduction et de valence 2), qui est considérée comme la principale origine de la réponse photovoltaïque. En raison de la position dominante de ce type de cellule, les alternatives possibles n'ont pas beaucoup retenu l'attention commerciale. D'un point de vue scientifique fondamental, la plupart des alternatives aux cellules Si monocristallines ou multi-cristallines ont souvent été décrites en termes de modèles valides pour ces derniers types de cellules (c'est-à-dire un « principe de diode » selon lequel la dissociation de charge et la charge la collecte dans les dispositifs photovoltaïques est déterminée par un champ électrostatique intégré). Cependant, cette

approche doit être examinée attentivement, au moins pour les DSSC avec leurs électrodes mésoporeuses nanocristallines et pour la plupart des types de cellules solaires organiques.Bisquert [1]

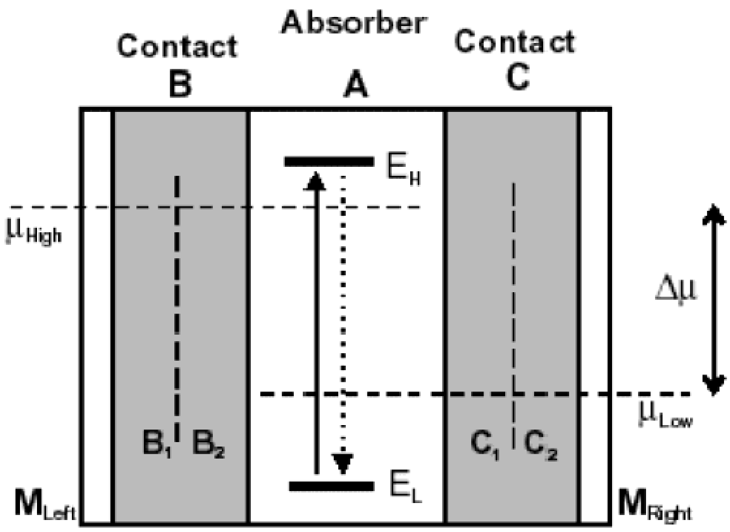


Figure 1- 1 :Schéma d'un convertisseur photovoltaïque idéalisé[2].

1.2. L'impact de la Température sur la Conversion Photovoltaïque :

La performance des cellules solaires diminue avec l'augmentation de la température, essentiellement en raison de l'augmentation des taux de recombinaison des porteurs internes, causée par des concentrations accrues de porteurs. La température de fonctionnement joue un rôle clé dans le processus de conversion photovoltaïque. L'efficacité électrique et la puissance de sortie d'un module photovoltaïque (PV) dépendent linéairement de la température de fonctionnement. Les différentes corrélations proposées dans la littérature représentent des équations de travail qui peuvent être appliquées aux modules PV ou aux panneaux photovoltaïques montés sur des cadres autoportants, des collecteurs PV-thermique et des panneaux photovoltaïques intégrés au bâtiment, respectivement. Les performances électriques sont principalement influencées par le matériau PV utilisé. De nombreuses corrélations pour la température cellulaire qui sont apparues dans la littérature impliquent des variables environnementales de base et des paramètres numériques qui dépendent du matériau ou du système. En général, le rapport de performance diminue avec la latitude en raison de la température. Cependant, les régions à haute altitude ont des ratios de performance plus élevés en raison de la basse température, comme le sud des Andes, la région de l'Himalaya et l'Antarctique. Modules PV avec une moindre sensibilité à la température est préférable pour les régions à haute température et une plus grande sensibilité à la température sera plus efficace dans les régions à basse température. La répartition géographique du potentiel d'énergie photovoltaïque compte tenu de l'effet de l'irradiation et de la température ambiante sur les performances du système PV doit être prise en compte. [3]

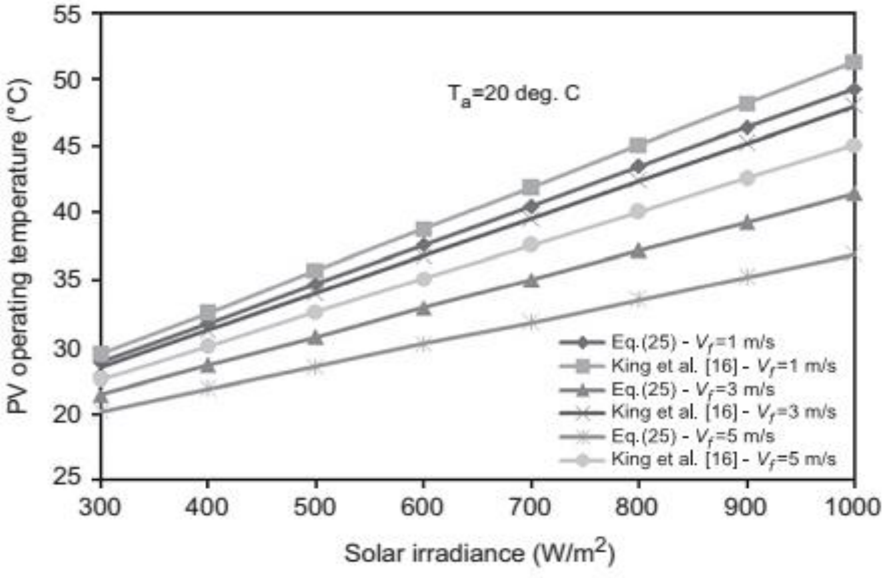


Figure 1- 2:Température de fonctionnement par rapport à la radiation solaire. [4].

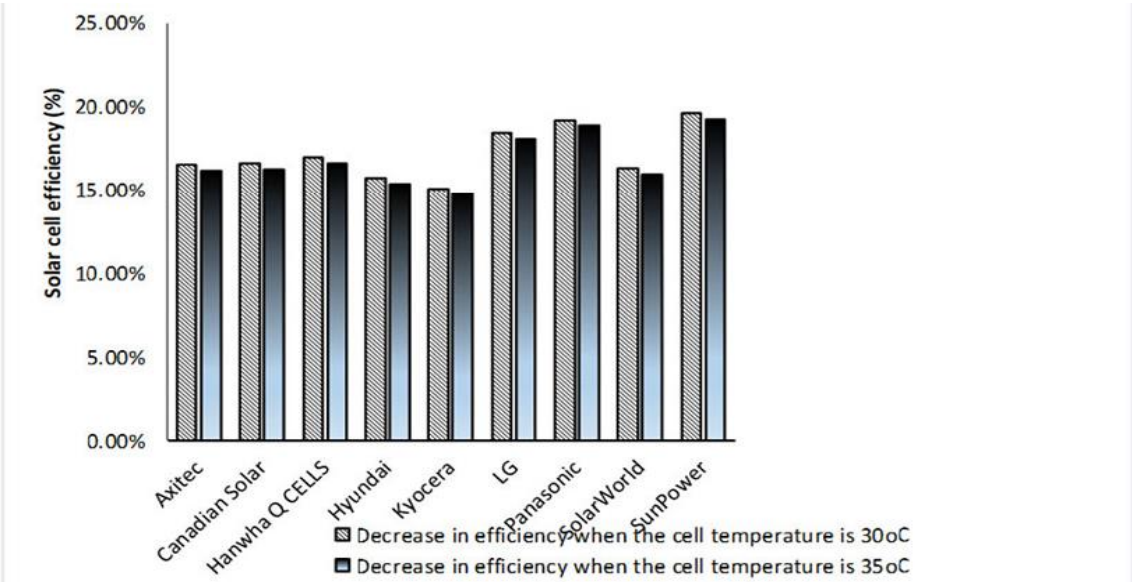


Figure 1- 3 :Effet de La température sur le rendement des panneaux photovoltaïques.[5].

1.3. Les capteurs solaires thermodynamique :

Un capteur solaire thermodynamique est une surface sombre exposée au soleil, elle absorbe de l'énergie solaire et se réchauffe. Un capteur solaire thermique fonctionnant sur ce principe consiste en une surface exposée au soleil qui transfère une partie de l'énergie à un fluide actif tel que l'eau ou l'air. Pour réduire les pertes de chaleur dans l'atmosphère et améliorer son efficacité, une ou deux feuilles de verre sont généralement placées sur la surface de l'absorbeur et une isolation est placée derrière l'absorbeur. Ce simple capteur solaire thermique est appelé capteur plat. Il peut atteindre des températures allant jusqu'à environ 100°C.

1.3.1 Chaleur solaire thermique :

La technologie solaire thermique utilise les rayons du soleil pour générer de la chaleur. Face à la récente croissance rapide de la technologie solaire photovoltaïque, la chaleur solaire est toujours le plus grand contributeur solaire à nos besoins énergétiques. En 2015, l'utilisation de capteurs solaires thermiques (vitrés et non vitrés) dans le monde a augmenté de plus de 6%. La capacité globale des collecteurs d'eau solaires à la fin de 2015 atteignait 435 GWth, tandis que les collecteurs d'air fournissaient 1,6 GWth, ce qui équivaut collectivement à une production de chaleur annuelle de 357 TWh (REN21, 2016).

Les capteurs solaires thermiques sont essentiellement de deux types, à savoir les collecteurs à plaques plates et les collecteurs à tubes sous vide. Les collecteurs à plaques plates (Figure 1.3) sont capables de fournir de la chaleur entre 80°C et 160°C avec des rendements aussi élevés que 60%. L'eau est principalement utilisée comme fluide caloporteur (Heat Transfer Fluid) dans les collecteurs à plaques plates. Si nécessaire, du glycol peut être ajouté comme agent antigel. L'air est également utilisé comme HTF, en particulier dans le cas d'applications de chauffage des locaux ou de séchage des récoltes.

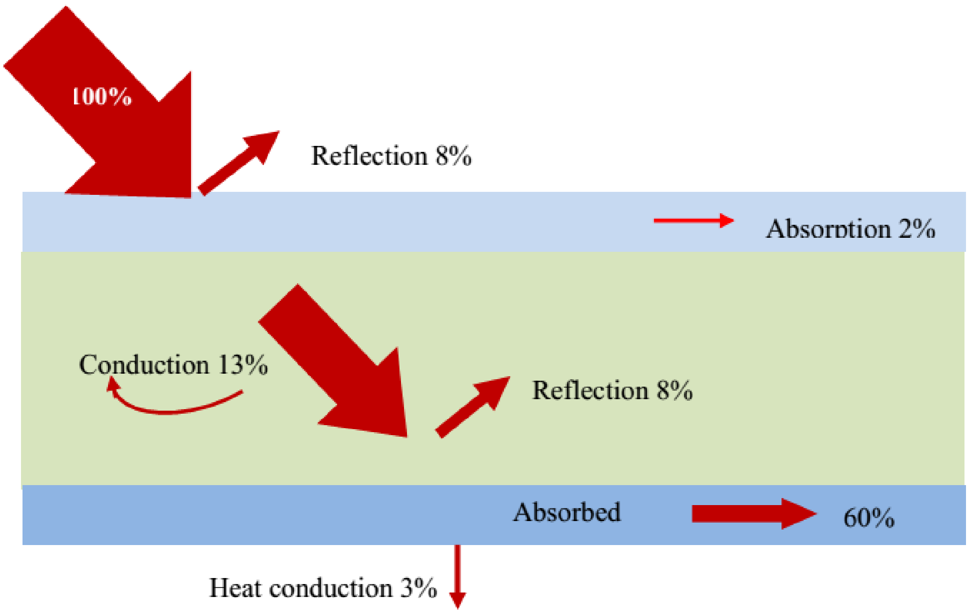


Figure 1- 4:*Pertes optiques et thermiques d'un collecteur plat (IEA, 2011).*

Les collecteurs à tubes sous vide sont constitués de tubes en verre sous vide connectés en parallèle qui facilitent l'élimination de la perte de chaleur par convection et par rayonnement. Le gain de température par ces capteurs peut être compris entre 77°C et 170°C. Bien que les collecteurs à tubes sous vide soient plus coûteux que les collecteurs à plaques plates classiques, ils offrent une efficacité suffisante pour les applications de chauffage commerciales et industrielles ainsi que pour plusieurs processus de refroidissement. Il existe deux technologies différentes dans le collecteur à tube sous vide : le collecteur à tube à écoulement direct et le collecteur à tube caloduc. Dans les tubes à écoulement direct, le fluide circule à travers des rangées de tubes en verre à l'intérieur de chacun desquels se trouve une ailette en aluminium lisse ou incurvée liée à un métal. Par contre, dans les collecteurs à

caloduc (figure 1.4), la chaleur collectée est véhiculée au moyen de caloducs sans contact direct avec le fluide.

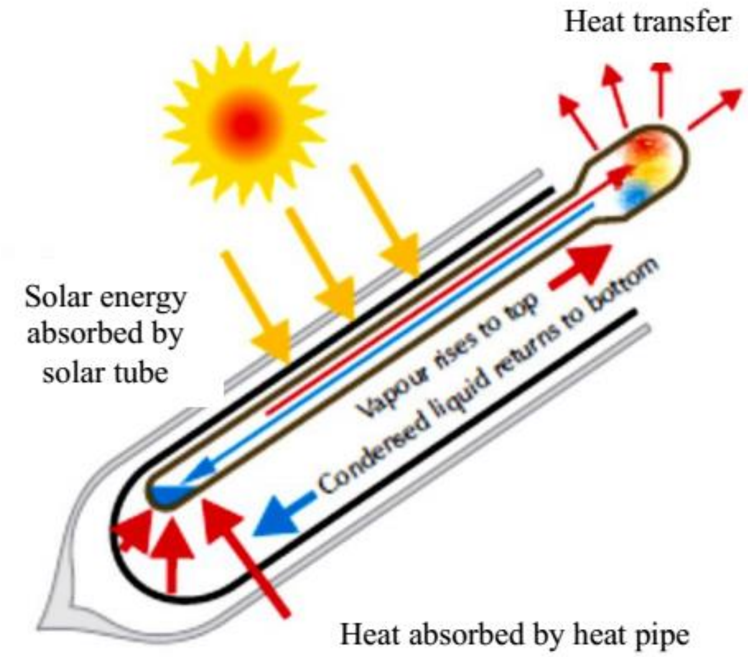


Figure 1- 5:*Collecteur à caloduc (IEA, 2011)*

1.3.2 Électricité solaire thermique :

Les capteurs solaires à concentrateur sont la troisième catégorie de capteurs qui utilisent des miroirs, des lentilles et des dispositifs de suivi pour concentrer les rayons du soleil sur une petite zone afin de produire une chaleur intense qui convient particulièrement aux applications à haute température comme la production de chaleur de procédé ou la génération de vapeur pour faire fonctionner des turbines à vapeur. Les centrales thermiques solaires (CTS), également appelées centrales solaires à concentration (CSC), utilisent des collecteurs concentrateurs avec un rapport de concentration aussi élevé que 100 à 1500 et produisent du fluide à une température de 450°C et plus. Les collecteurs à concentration, générant de la chaleur à des températures comprises entre 150°C et 300°C, conviennent au refroidissement solaire et à la production combinée de chaleur et d'électricité. En revanche, les capteurs fonctionnant entre 250°C et 450°C conviennent aux centrales solaires thermiques [6].

Ces capteurs fonctionnent le mieux dans les régions où l'irradiation solaire directe est disponible presque toute l'année. Il existe plusieurs types de collecteurs à concentration, tels que la cuve parabolique, l'antenne parabolique et la tour solaire. Les creux paraboliques sont de longs réflecteurs en forme de parabole avec un tube récepteur placé au niveau de la ligne focale de la parabole. L'habituel énergie solaire absorbée par le tube solaire Transfert de chaleur La chaleur absorbée par le rapport de concentration du caloduc des creux paraboliques varie de 30 à 100, suffisamment pour atteindre des températures autour de 350°C. La parabole ou le moteur solaire est une très grande parabole en miroir, généralement équipée d'un

dispositif de suivi pour intercepter une irradiation maximale toute la journée. Avec un rapport de concentration beaucoup plus élevé que les auges solaires, les paraboles solaires peuvent atteindre températures autour de 750°C. Dans la tour d'énergie solaire (également connue sous le nom de récepteur central), un échangeur de chaleur est monté sur une tour entourée de centaines à des milliers de miroirs plats et de suivi du soleil appelés héliostats qui réfléchissent et concentrent les rayons du soleil sur l'échangeur de chaleur. De cette manière, l'énergie peut être amplifiée d'environ 1500 fois l'énergie incidente (EIA, 2015). La figure 2.5 présente les applications du capteur solaire à concentration avec les températures de fonctionnement correspondantes. Les collecteurs paraboliques composés sont de type spécial au collecteur de concentrateur conçu sous la forme de deux paraboles de rencontre de manière à concentrer l'irradiation solaire. La température de ces capteurs varie de 100°C à 170°C.

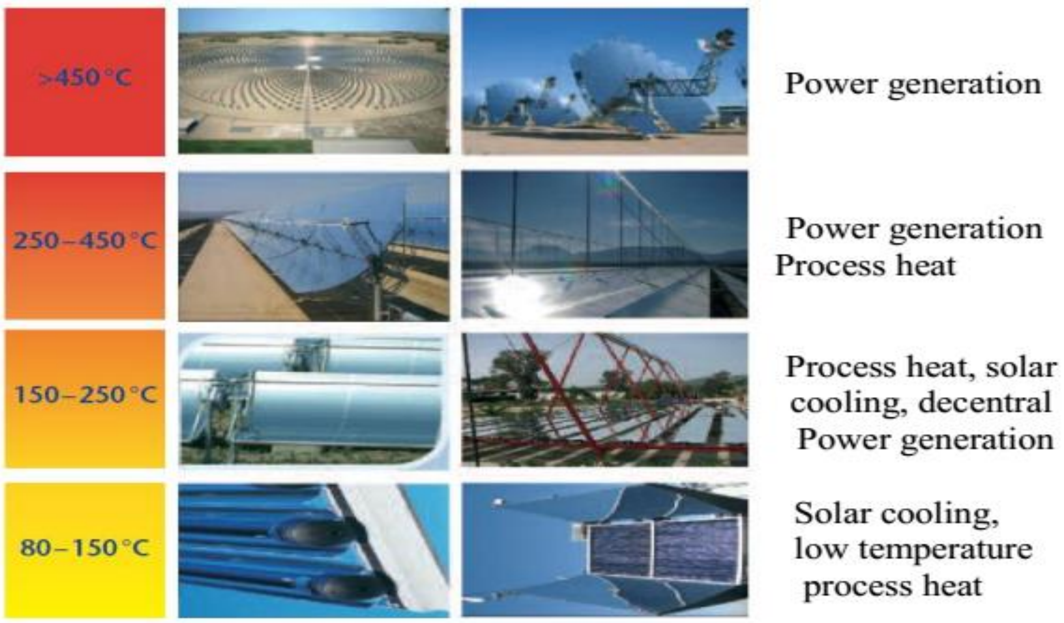


Figure 1- 6 :Applications du capteur solaire à concentration.

Les centrales solaires thermiques, comme le montre la figure 1.6, fonctionnent essentiellement sur le même principe que les centrales électriques à turbine à vapeur à combustible fossile conventionnelles. Dans ce cas, l'énergie solaire hautement concentrée réchauffe le fluide de l'échangeur de chaleur. Le fluide chaud échange ensuite de la chaleur avec de l'eau pour générer de la vapeur. La vapeur fait fonctionner une turbine à travers un générateur qui produit de l'électricité. La capacité des centrales CTS peut atteindre plusieurs centaines de mégawatts. La capacité installée mondiale de CTS aujourd'hui est d'environ 5 GW [7].

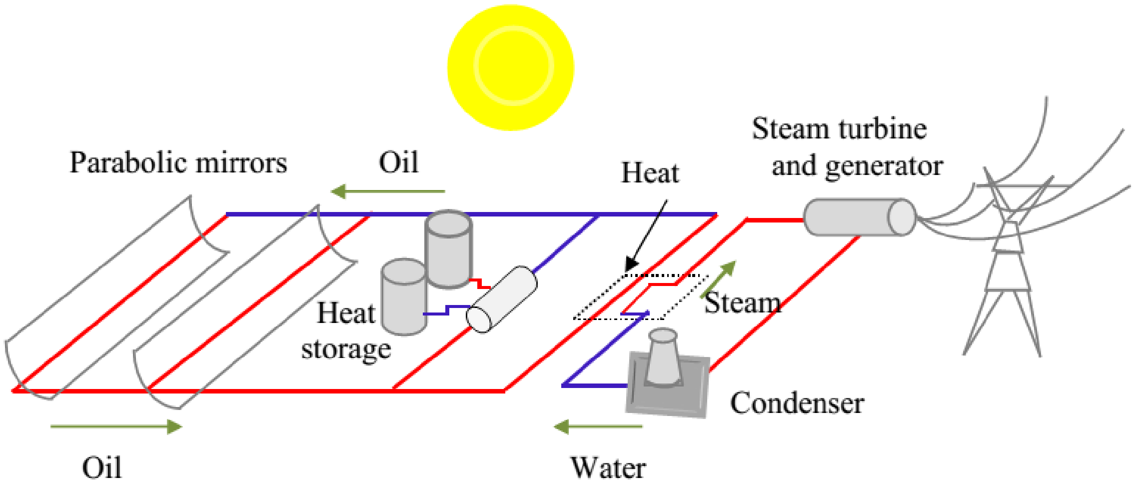


*Figure 1- 7:*Centrale solaire thermique.

1.4. Les capteurs hybrides photovoltaïque/thermique (PVT) :

La technologie thermique photovoltaïque hybride (PV / T) est une technologie de cogénération bien conçue qui intègre des modules photovoltaïques (PV) et un capteur solaire thermique dans une seule unité [8].

Le panneau combiné produit à la fois de l'électricité et de la chaleur à partir du rayonnement solaire absorbé offrant une efficacité de cogénération de jusqu'à 80%. L'efficacité des cellules solaires est sévèrement affectée par l'élévation de la température. En raison de l'augmentation de la température, la chaleur est générée dans les cellules photovoltaïques qui peuvent être extraites par un échangeur de chaleur à travers des médias de transfert de chaleur, puis la chaleur collectée peut être utilisée dans la maison, les industries et à d'autres fins commerciales. Le collecteur PV/T est un système d'énergie solaire qui fournit à la fois de l'électricité et de la chaleur avec une efficacité plus élevée que les miroirs paraboliques séparés PV et solaires. De plus, le coût de fabrication et d'installation de ce collecteur hybride est moindre. L'air et l'eau sont tous deux utilisés comme fluide caloporteur dans le PV/T. Le collecteur PV/T à base d'eau peut être couvert ou découvert. Dans les capteurs PV/T non couverts, un caloduc est fixé à l'arrière du module PV; alors que si la même unité est placée à l'intérieur de collecteurs de chaleur solaire à plaques, elle est alors qualifiée de PV/T couvert. Le PV/T recouvert peut augmenter les températures de sortie du fluide relativement plus élevées que le fluide découvert en raison de l'isolation supplémentaire du couvercle en verre transparent [9].

En revanche, les meilleures performances électriques sont obtenues avec des collecteurs hybrides découverts [10] .

La demande d'énergie thermique et électrique est souvent complémentaire. Le système thermique photovoltaïque est un système de cogénération solaire, fusionnant le module photovoltaïque et le capteur solaire thermique en une seule unité pour fournir à la fois de l'électricité et de la chaleur simultanément. La motivation initiale derrière l'intégration du PV avec la technologie solaire thermique était que l'efficacité PV se détériorait avec

l'augmentation de la température ; cette diminution des performances PV peut être compensée dans une certaine mesure en évacuant la chaleur du module et en exploitant la chaleur perdue dans des applications de chauffage utiles qui conduisent à la technologie hybride PV/T.

On rapporte que [11] fabrique le premier système PV/T liquide à plaque plate pour le chauffage résidentiel. L'auteur a monté un module photovoltaïque sur un collecteur thermique non concentré équipé d'une batterie pour le stockage électrique et d'un réservoir d'eau pour recueillir l'eau chaude. Le système de fusion s'est révélé techniquement viable et rentable. [12] a développé un modèle mathématique de ce système de combinaison en utilisant le logiciel TRNSYS. Plus tard, le même chercheur a appliqué le modèle thermique Hottel-Whillier basé sur l'efficacité décroissante de la cellule avec la température pour analyser les performances d'un collecteur PV/T à plaque plate qui a fait la base du modèle PV/T TYPE 50 dans TRNSYS.

[13] Ont développé et testé des collecteurs PV/T hybrides selon les normes ASHRAE au Laboratoire Lincoln de l'Université du Texas pour le Département américain de l'énergie, de la conservation et de l'application solaire. Les auteurs ont conclu que le rendement énergétique effectif par unité de surface des capteurs hybrides est supérieur à celui du module PV individuel et du capteur thermique. En 1979 [14] a théoriquement analysé et évalué expérimentalement la performance thermique et électrique du capteur solaire PV/T avec à la fois l'air et le liquide comme fluide caloporteur. Les résultats expérimentaux se sont avérés correspondre étroitement aux résultats théoriques. Il a été observé pour le collecteur de liquide et d'air que les rendements thermiques diminuent (de 42,5% à 40,4% pour le liquide et de 40% à 32,9% pour le collecteur d'air) lorsque l'énergie électrique est prise en sortie. Le rendement électrique maximal obtenu était de 6,8%.

1.4.1 Concept de capteur PV/T :

Le schéma des technologies PVT est présenté sur la figure 2.7. Les doubles fonctions du PVT se traduisent par un taux de conversion solaire global plus élevé que celui du seul PV ou capteur solaire, et permettent ainsi une utilisation plus efficace de l'énergie solaire. La demande de chaleur solaire et d'électricité solaire étant souvent complémentaire, il semble logique de développer un appareil capable de répondre aux deux demandes. Les cellules photovoltaïques (PV) utilisent une fraction du rayonnement solaire incident pour produire de l'électricité et le reste est principalement transformé en chaleur résiduelle dans les cellules et le substrat augmentant la température du PV, le rendement du module a donc diminué. La technologie photovoltaïque thermique (PVT) récupère une partie de cette chaleur et l'utilise pour des applications pratiques.

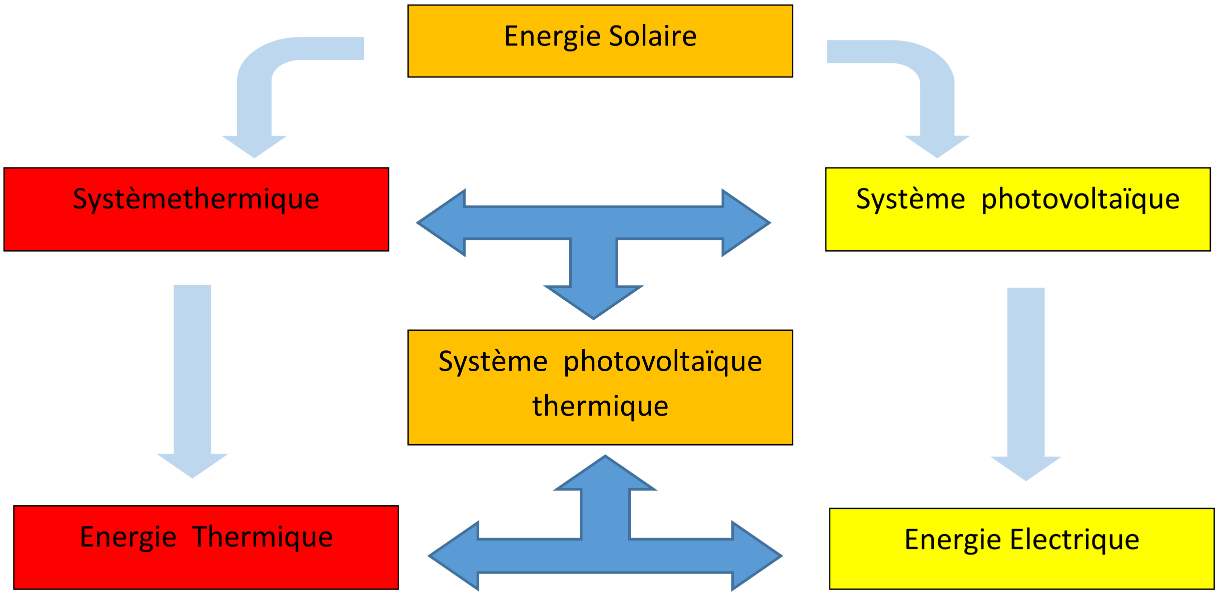


Figure 1- 8:Schéma de diverses technologies solaires.

Le refroidissement simultané du module PV maintient le rendement électrique à un niveau satisfaisant et ainsi le collecteur PVT offre une meilleure façon d'utiliser l'énergie solaire avec un rendement global plus élevé. Il existe des approches alternatives dans l'intégration PVT. Parmi beaucoup d'autres, il peut y avoir des sélections parmi les collecteurs d'air, d'eau ou d'évaporation, de silicium monocristallin / polycristallin / amorphe (c-Si / pc-Si / a-Si) ou de cellules solaires à couches minces, à plaques plates ou à concentrateurs, vitrées ou panneaux non vitrés, fluides naturels ou forcés, éléments autonomes ou intégrés au bâtiment, etc. Un important travail de recherche et développement sur la technologie PVT a été mené ces dernières années avec une augmentation progressive du niveau des activités. Les caractéristiques intéressantes du système PVT sont (6):

- Il a un double objectif : le même système peut être utilisé pour produire de l'électricité et de la chaleur.
- Il est efficace et flexible : l'efficacité combinée est toujours supérieure à celle de l'utilisation de deux systèmes indépendants et est particulièrement intéressante dans le cas du PV intégré au bâtiment (BIPV) lorsque l'espacement entre les panneaux de toit est limité.
- Il a une large application : la puissance calorifique peut être utilisée à la fois pour des applications de chauffage et de refroidissement (refroidissement par déshydratant) en fonction de la saison et étant pratiquement adaptée aux applications domestiques.
- Il est bon marché et pratique : il peut être facilement mis à niveau / intégré au bâtiment sans aucune modification majeure et le remplacement du matériau de toiture par le système PVT peut réduire la période de récupération.

1.4.2 Type de capteur PV/T :

Différents types de capteurs thermiques PV sont actuellement utilisés, tels que le PVT / air, le PVT / eau et le capteur concentré PVT

1.4.2.1 Capteurs PV/T à air :

L'air agit comme un fluide de travail dans le système PV / T. Il est utilisé pour maintenir la température du module PV à des niveaux optimaux, ce qui permet d'obtenir une production d'énergie élevée. De plus, le système de chauffage est utilisé pour le séchage, le chauffage et la ventilation des locaux, etc.

Collecteur d'air plat :

Le collecteur à plaque plate est considéré comme la partie principale de tout système solaire. Il est utilisé pour absorber et collecter l'énergie du soleil et la convertir en chaleur, puis la transférer dans un courant de liquide ou de gaz [15].

Évaluation des performances et de la conception :

La performance du débit d'air pour les collecteurs PV/T à simple passage, double conduit avec ailettes a été élaborée [16] . Le collecteur comporte trois composants principaux : le couvercle en verre, les cellules photovoltaïques et la plaque absorbante. Pour augmenter la capacité d'évacuation de la chaleur des cellules photovoltaïques, des ailettes en aluminium sont fixées au collecteur. Une expérience a été menée pour évaluer les effets du débit massique sur l'efficacité du système. Les recherches ont montré que l'augmentation du débit massique entraînera une augmentation de l'efficacité électrique.

[17] Ont étudié les performances du collecteur d'air PV/T. Un collecteur d'air PV/T vitré, avec et sans configuration de conception de fanons aété envisagé. En outre, ils ont dérivé l'expression analytique de la température des cellules PV, de la surface arrière du module, du taux d'extraction de l'énergie thermique utile du système. Résultats a montré que le capteur PV/T vitré sans fanon offre les meilleures performances. L'efficacité combinée du système (thermique + électrique) est augmenté avec l'augmentation du débit massique d'air en raison de la réduction des pertes du système, et diminue avec l'augmentation de la longueur du module et de la température de la cellule photovoltaïque.

[18] ont présenté le flux d'air naturel Systèmes PV/T. Ils ont étudié les améliorations du transfert de chaleur dans le canal d'air grâce à la suspension de tôles et / ou d'ailettes au milieu et à l'arrière du canal d'air. Par ailleurs, un modèle numérique a été développé et validé les données expérimentales. Ils ont conclu qu'il existe un accord étroit entre les données mesurées et prévues.

[19] Ont développé un collecteur d'air PV/T à double passage avec des ailettes verticales dans le canal d'air inférieur (Figure 1.8). Ils ont conclu que les ailettes de grande surface peuvent réduire considérablement la température des cellules de 88°C à 66°C. De plus, plus le facteur de compactage est élevé, plus la production de puissance électrique par unité de surface de collecteur est élevée, ce qui permettra de contrôler la température de la cellule.

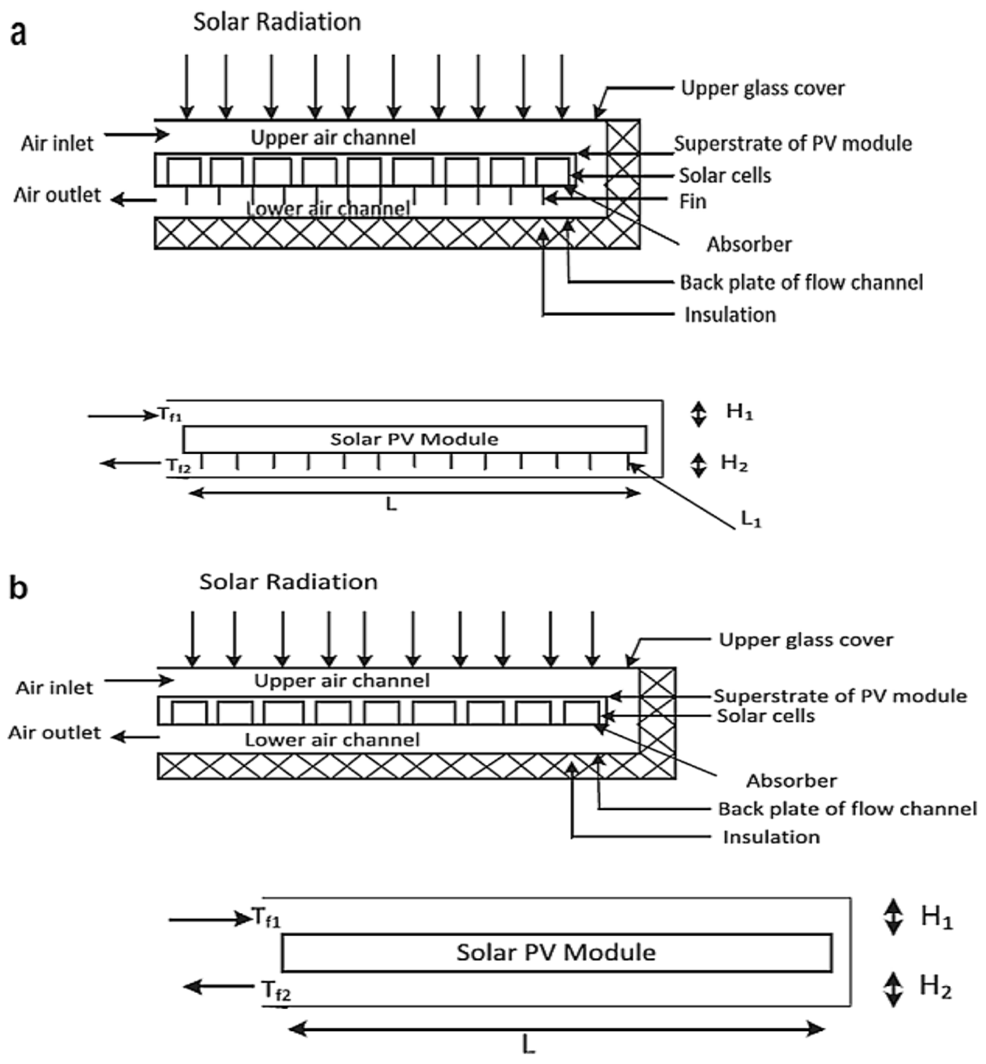


Figure 1- 9 : *(*a) Vue en coupe d'un aérotherme solaire PV / T à double passage avec ailettes. (b) Vue en coupe de l'aérotherme solaire PV / T à double passage sans ailettes (Kumar et Rosen 2011).

[20] Ont réalisé une représentation graphique du taux de production de chaleur et de l'élévation de température en fonction du nombre d'unités de transfert NTU, ce qui a permis d'illustrer l'influence des valeurs des paramètres fondamentaux sur les performances thermiques du collecteur d'air PV/T (Figure 1.9). Dans le but de maximiser la production thermique et électrique, un système d'air PV/T en boucle ouverte, non vitré, à un seul passage, a été conçu à Sydney. Le collecteur d'air PV/T était positionné vers le nord avec un angle d'inclinaison de 34° et utilisait six modules PV sans cadre de 110 Wc (Figure 1.10). Ils ont conclu que les rendements thermique (12–55%) et électrique (10,6–12,2%) peuvent être augmentés en augmentant le débit massique d'air.

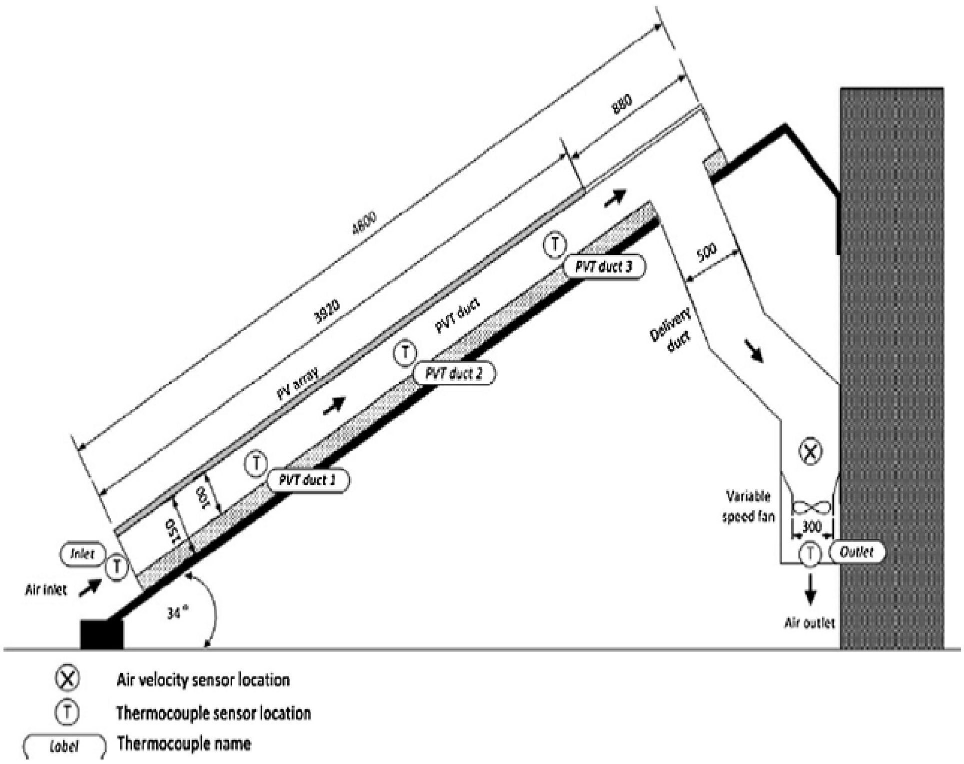


Figure 1- 10 :Schéma d'un Système PV/T (Bambrook et sproul 2012).

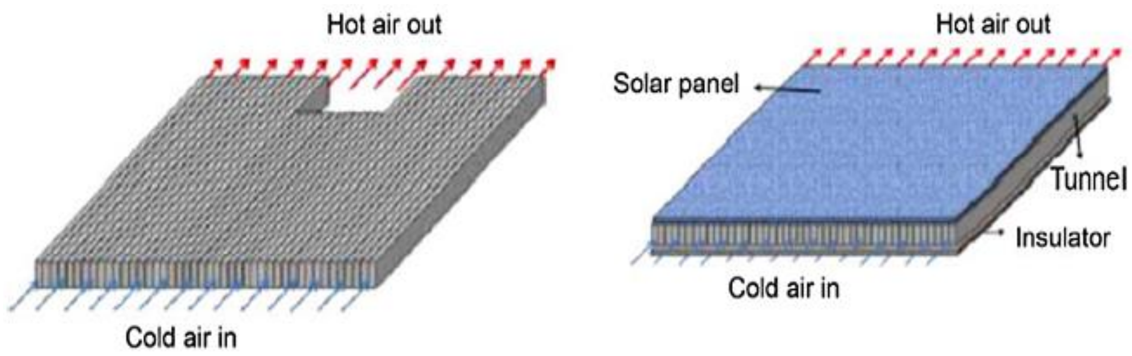


Figure 1- 11 :PV/T à un seul passage avec conception de tunnel rectangulaire (Jin et al. 2010).

Une enquête détaillée a été menée pour étudier les performances d'un capteur solaire photovoltaïque thermique (PV/T) [21]. Un modèle électrique et thermique a été développé pour calculer les paramètres électriques et thermiques d'un collecteur d'air PV/T typique. Ces paramètres sont la température de l'air de sortie, la température de la surface arrière, la température de la cellule solaire, etc. Afin d'améliorer le modèle thermique du collecteur d'air PV/T, certaines corrections ont été apportées sur les coefficients de perte de chaleur. Par ailleurs, un développement sur le modèle électrique a été réalisé pour estimer les paramètres électriques tels que la tension en circuit ouvert, le courant de court-circuit, la tension et le courant de point de puissance maximum. Un grand accord obtenu entre les résultats de la simulation numérique et les mesures expérimentales. Il a été constaté que le rendement électrique, thermique et combiné du système est de 17,18%, 10,01% et 45%, respectivement.

Des études sur l'évaluation des performances exergétique d'un collecteur d'air photovoltaïque thermique (PV/T) ont été étudiées. L'analyse de l'éxergie et de l'énergie a été évaluée pour calculer les efficacités électriques, thermiques, énergétiques et exérgétique. Le développement d'un programme de simulation a été produit pour calculer l'efficacité de sortie du système (électrique / thermique). Il a été conclu que les résultats de la simulation sont en bon accord avec les données expérimentales.

La performance de la façade thermique photovoltaïque hybride à double passage pour le chauffage des locaux a été évaluée [22]. En utilisant les équations du bilan énergétique, la modélisation thermique a été développée dans des conditions quasi-stationnaires. Des expressions numériques ont été analysées. Il a été montré que les énergies électrique et thermique annuelles sont respectivement de 469,87 kWh et 480,81 kWh.

[23] Ont étudié les performances de capteurs PV/T à double passage avec ailettes. (Figure 1.11) montre le système hybride composé de panneaux photovoltaïques et d'ailettes collées respectivement sur et sous la plaque absorbante. Un modèle mathématique a été développé; ils ont conclu que le système hybride proposé peut maximiser l'efficacité de sortie totale.

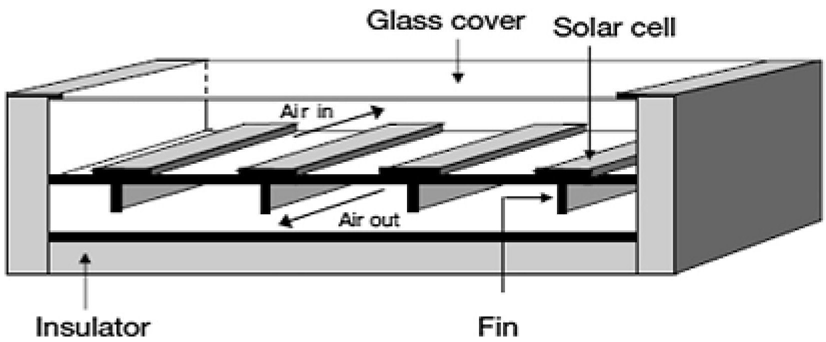


Figure 1- 12 :Le Modèle schématique d'un collecteur d'air photovoltaïque / thermique à ailettes double passe (Othman et al. 2007).

1.4.2.2 Capteur PV/T à eau :

Le liquide peut être utilisé comme fluide d'évacuation de la chaleur dans le collecteur PV/T Le collecteur de type liquide est plus efficace et pratique que le collecteur de type air qui est en raison de la variation de température dans le liquide beaucoup moins comparé à l'air qui est basé sur la fluctuation des niveaux d'intensité solaire.

Évaluation des performances et de la conception :

Patrick et coll[24] ont étudié les performances thermiques et électriques de plusieurs concepts PV/T à plaque plane à vitrage unique basés sur la circulation de l'eau en utilisant un modèle thermique bidimensionnel simple en régime permanent. Le collecteur a été testé en effectuant une expérience utilisant la méthode de stratification d'un seul emballage, en se concentrant sur un transfert de chaleur amélioré entre les cellules PV et le fluide de refroidissement et sur des performances optiques améliorées. Les résultats expérimentaux ont montré des améliorations significatives de l'efficacité thermique et électrique de près de 88%.

Des études sur l'analyse exergétique et énergétique des capteurs d'eau photovoltaïques/thermiques (PV/T) avec et sans couvercle en verre ont été réalisées [25]. Ils ont découvert que le collecteur PV/T vitré convient pour augmenter la température ambiante et le rayonnement solaire. D'un autre côté, un collecteur non vitré est plus favorable pour augmenter l'efficacité de la cellule PV, la vitesse du vent, le rapport débit massique d'eau sur la surface du collecteur et le facteur d'emballage.

[26] ont effectué une analyse sur un collecteur d'eau PV/T connecté en série. En utilisant la modélisation théorique, l'étude de performance du collecteur d'eau PV/T partiellement couvert connecté en série a été évaluée. En outre, ils ont développé une expression analytique du nombre N de collecteurs basée sur des équations de bilan énergétique. Ils ont présenté une analyse de l'énergie électrique, de l'énergie thermique et de l'éxergie en ajustant le nombre de collecteurs connectés en série. Les résultats ont montré que l'eau PV/T partiellement couverte et entièrement couverte Le collecteur convient à la production d'eau chaude et à la génération électrique, respectivement.

L'Analyse exergétique d'un chauffe-eau photovoltaïque/thermique intégrée (Fig. 8) dans des modes de débit constant et de température de collecte constante a été étudié [27]. On a remarqué que le rendement thermique et exergétique global maximal était de 0,006 kg/s de débit d'eau chaude.

Un système photovoltaïque/collecteur thermique (PV/T) avec une nouvelle configuration a été proposé par [28, 29]. La température de l'eau de sortie, les rendements thermique, électrique et combiné du système PV/T dans différentes conditions climatiques de Malaisie (ensoleillé et nuageux) ont été étudiés. Sur la base des résultats analytiques, l'efficacité thermique horaire la plus élevée d'une journée ensoleillée est de 61,3%, alors qu'elle est de 59,6% pour la journée nuageuse. Les rendements électriques sont respectivement de 12,89% et 13,03% pour un temps ensoleillé et nuageux typique. En revanche, les rendements horaires combinés (PV/T) les plus élevés sont respectivement de 74,1% et 72,63% pour les jours ensoleillés et nuageux typiques.

L'évaluation des opportunités économiques et techniques d'utilisation des systèmes PVT dans l'industrie a été étudiée par [30]. Sur la base de trois paramètres que sont le rayonnement solaire, la température de l'air et de l'eau, un modèle analytique est développé pour évaluer les indicateurs économiques et les paramètres énergétiques. Par conséquent, le modèle mathématique développé est utilisé pour simuler le système PVT sous différents endroits climatiques roumains. Il a été conclu que le chauffage de l'eau du système PVT dans le domaine industriel est économiquement attractif et que la période de récupération est inférieure à sa durée de vie (Figure 1.12).

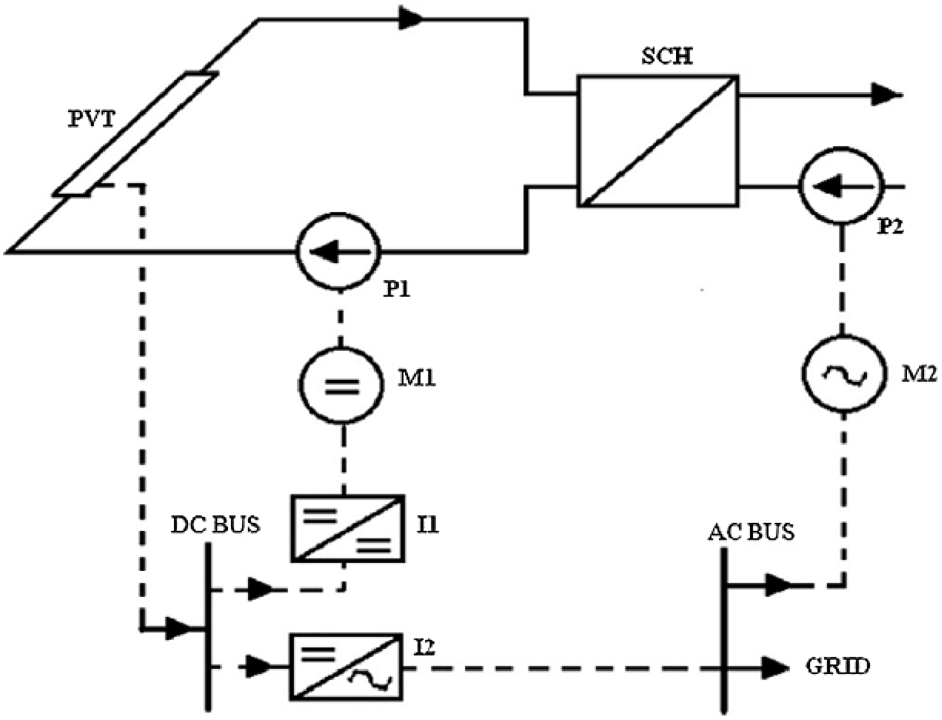


Figure 1- 13 : Schéma du système PVT - Système Thermique Photovoltaïque; SCH - Echangeur de Chaleur; P1, P2 - Pompes; Moteur M1-DC M1 - Moteur AC; I1 - Contrôleur CC, I2 - onduleur CC/CA; Boîte de Connexion DC - DC; Boîte de Connexion AC - AC (Hazi et al., 2014).

Un PVT à base d'eau avec un modèle transitoire a été présenté Bilbao et Sproul[31]. Sur la base de l'analogie électrique-thermique, une approche nodale a été utilisée pour le nouveau modèle afin d'analyser la réponse thermique du système PVT à base d'eau (Figure 1.13). Un flux de chaleur unidimensionnel est modélisé et des températures moyennes sont utilisées pour le fluide et la plaque absorbante afin d'évaluer la puissance thermique transitoire du PVT. Les résultats révèlent que le nouveau modèle proposé était en bon accord avec la mesure expérimentale et qu'il pourrait être utilisé pour la conception du produit et l'analyse des performances.

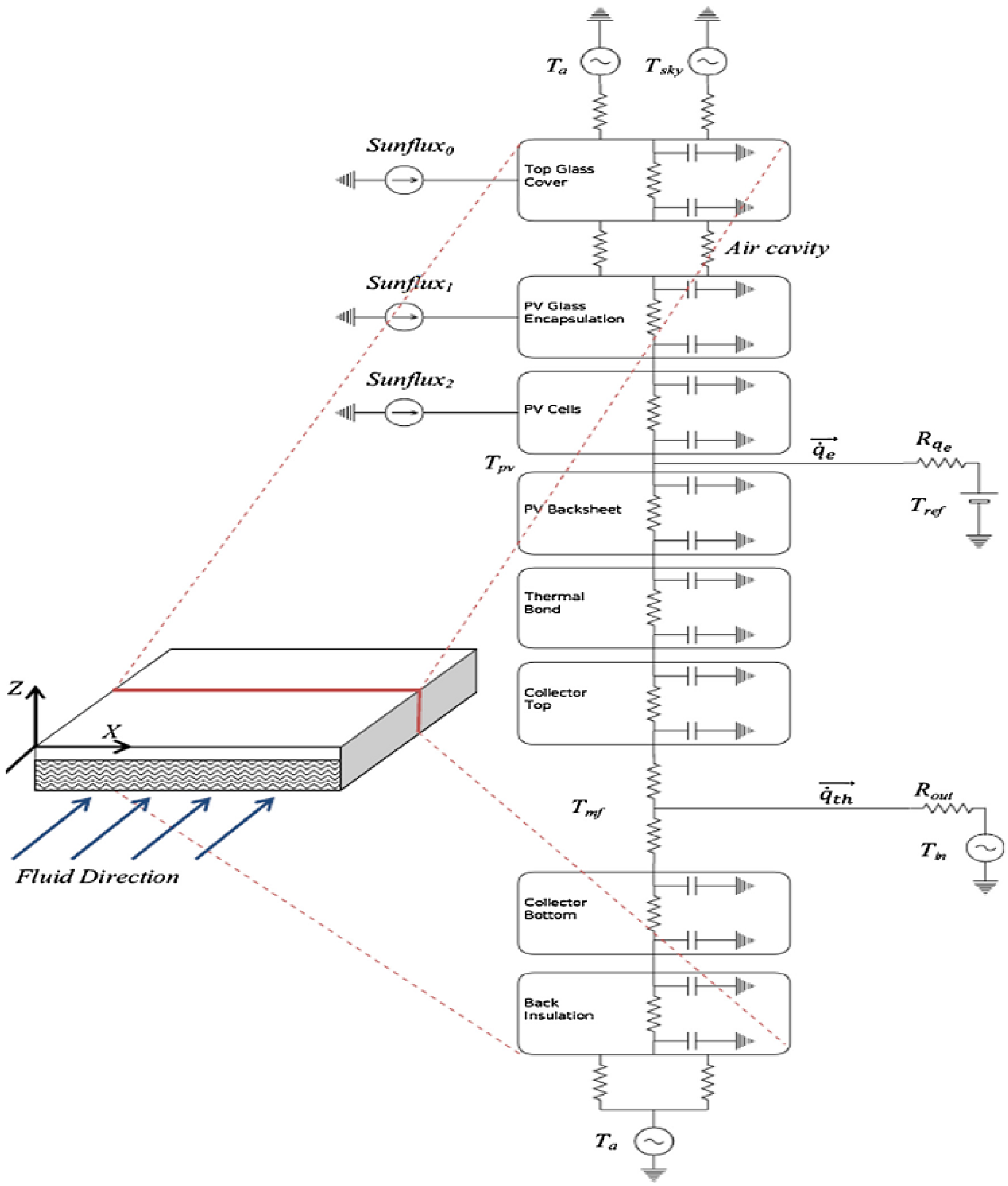


Figure 1- 14 : Schéma du modèle RC pour PVT vitré (Bilbao et Sproul, 2015).

1.5. Les capteurs thermodynamiques à absorption direct du rayonnement solaire (DASC) :

Le type le plus courant de capteurs solaires thermiques utilise une surface noire comme absorbeur, qui transfère ensuite la chaleur à un fluide circulant dans des tubes noyés à l'intérieur ou fondus sur la surface. Dans ce cas, l'efficacité est limitée non seulement par l'efficacité avec laquelle l'absorbeur capte l'énergie solaire, mais également par l'efficacité avec laquelle la chaleur est transférée au fluide de travail. Une approche qui a été proposée pour améliorer l'efficacité des capteurs tout en simplifiant le système consiste à absorber directement l'énergie solaire dans le volume de fluide, le soi-disant capteur solaire à absorption directe DASC.

Les concepts de collecteur solaire à absorption directe (DASC) sont basés sur le fluide de travail absorbant tout ou une bonne partie du flux solaire incident sur le capteur. Dans le collecteur, il peut ne pas y avoir de surface de séparation séparant le fluide de travail du flux solaire. Le DASC a été initialement proposé dans les années 1970 comme une simplification de la conception des capteurs solaires thermiques et comme un moyen d'améliorer potentiellement l'efficacité en absorbant l'énergie avec le volume de fluide. Les fluides typiques utilisés dans les capteurs solaires thermiques ont été montré avoir des propriétés d'absorption des rayons infrarouge et uv .

les concepts de collecteur du rayonnement solaire DAC de [32] en ce qui concerne les caractéristiques générales et des modèles détaillés et des expériences ont été développés sur différents modèles avec différents fluides comme le montrent les figures ci-dessous

[33] ont concentré son analyse sur une solution qui semble particulièrement adaptée à un processus de construction et d'industrialisation simple et robuste: elle consiste à superposer une fine couche d'eau s'écoulant dans une boîte en polycarbonate (Figure 1.15) au panneau photovoltaïque dans une telle manière d'absorber le rayonnement infrarouge sans modifier la partie visible du spectre. La partie arrière du panneau est recouverte d'une couche de 4 cm de polyuréthane afin d'éviter les pertes de chaleur. Ci-après, cette solution particulière sera appelée intégration de panneaux solaires thermiques électriques (TESPI).

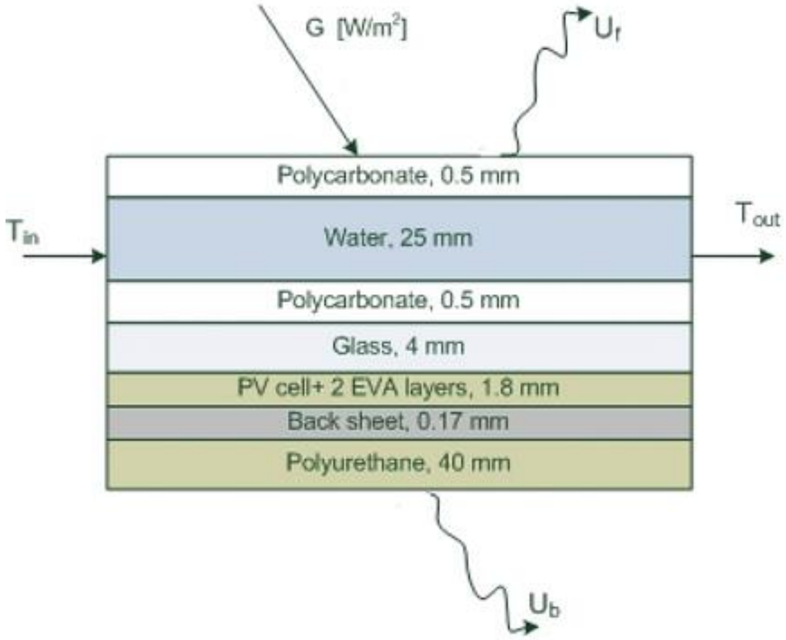


Figure 1- 15 :Schéma des couches de TESPI et principaux flux d'énergie. La chaleur est perdue à travers la surface en polycarbonate et la couche inférieure de polyuréthane.

La référence (Hishikawa et Morita, 2003) montre que la perte des performances d'un module PV est due à des paramètres tels que la transmittance du verre optique, la réponse spectrale et le courant de court-circuit dans la partie rouge et infrarouge du spectre solaire, ce qui implique que le La solution TESPI augmente la stabilité des performances électriques. Le

long d'une ligne d'analyse analogue, des expériences et des simulations détaillées ont été réalisées par Zondag (2008) avec des résultats en accord avec les modèles de simulation mais mettant l'accent sur deux problèmes principaux:

- la couche d'eau doit être contenue dans une boîte transparente en verre ou en polycarbonate de grande surface (environ un mètre carré ou plus) afin qu'une pression très basse génère des forces qui gonflent la boîte transparente,
- si une efficacité raisonnable pour le collecteur de chaleur est requise, l'arrière du panneau doit être isolé avec un matériau à faible conductivité, ce qui augmente la température PV avec un effet négatif sur son efficacité.

Ces deux problèmes sont gérés en utilisant une structure de boîte transparente particulière comme le montre la figure 1.15. La boîte (qui a été testée avec différents matériaux: verre, plexiglas et polycarbonate) a une série de plaques qui génèrent des canaux pour le flux d'eau.

Dans la configuration à deux absorbeurs, un stratifié PV transparent est utilisé comme absorbeur principal et une feuille de métal noir à haute capacité d'absorption est utilisée comme absorbeur secondaire (figure 1.18). Il y a deux passages d'écoulement d'eau séparés par un passage d'écoulement d'air. L'eau entre par le canal supérieur (flux primaire) et retourne (flux secondaire) par le canal inférieur. Cette conception distincte a été étudiée dans le cadre du programme de développement PV/T du Massachusetts Institute of Technology (MIT) et un rendement thermique élevé a été observé (Hendrie, 1979). Plusieurs adaptations sont possibles dans la conception de capteurs PV/T à deux absorbeurs, à savoir. Inclusion d'une couche isolante transparente entre le canal primaire et secondaire et remplacement du canal d'eau sous l'absorbeur métallique secondaire par une feuille-et-tube. La première configuration s'est avérée efficace pour réduire les pertes de chaleur supplémentaires.

La technologie pour la plupart des systèmes DAC discutés n'a pas encore été développée, et les collecteurs ne sont pas disponibles dans le commerce sous la forme de structures préassemblées adaptées à l'installation.

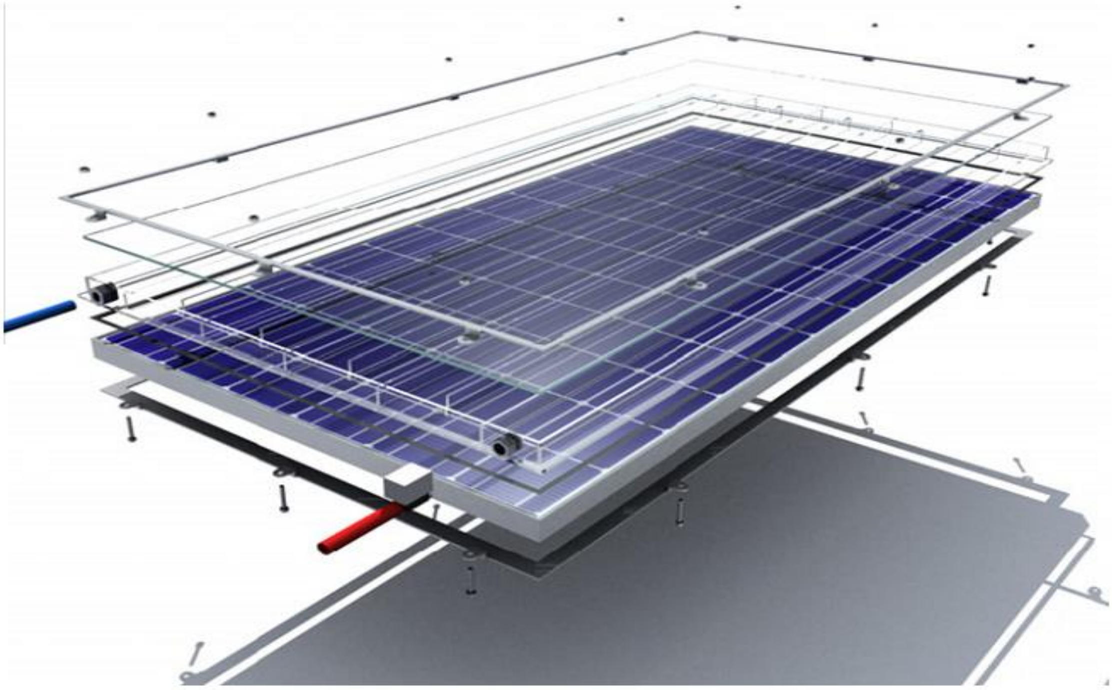


Figure 1- 16 : Vue éclatée du panneau TESPI (Rosa-Clot et al.2011)

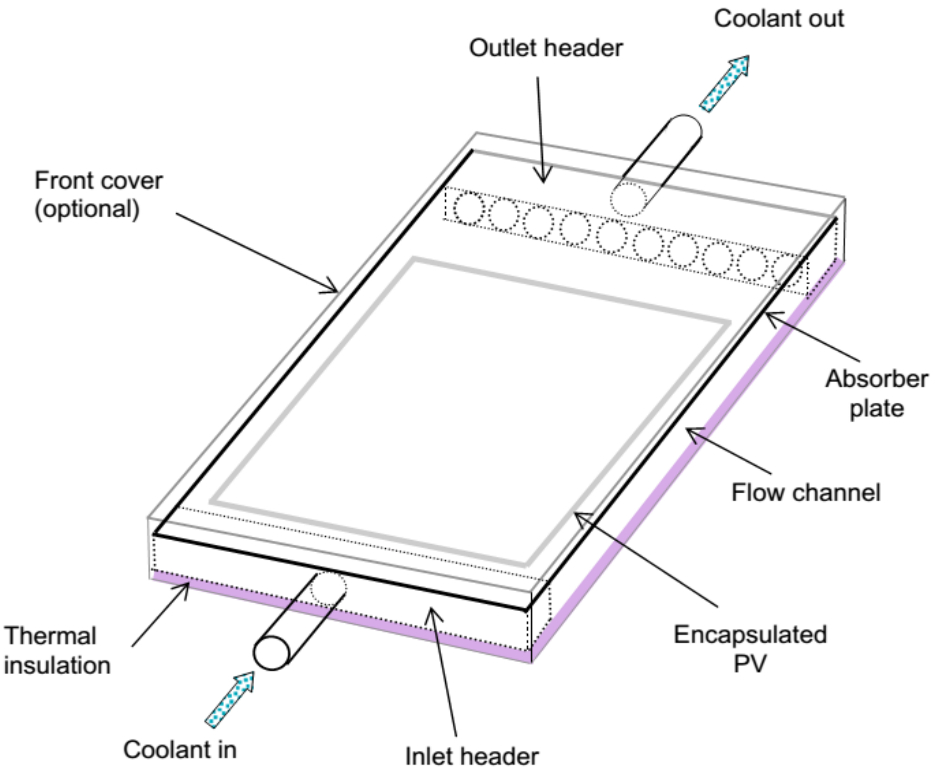


Figure 1- 17 : Principales caractéristiques du capteur plat PV/T.

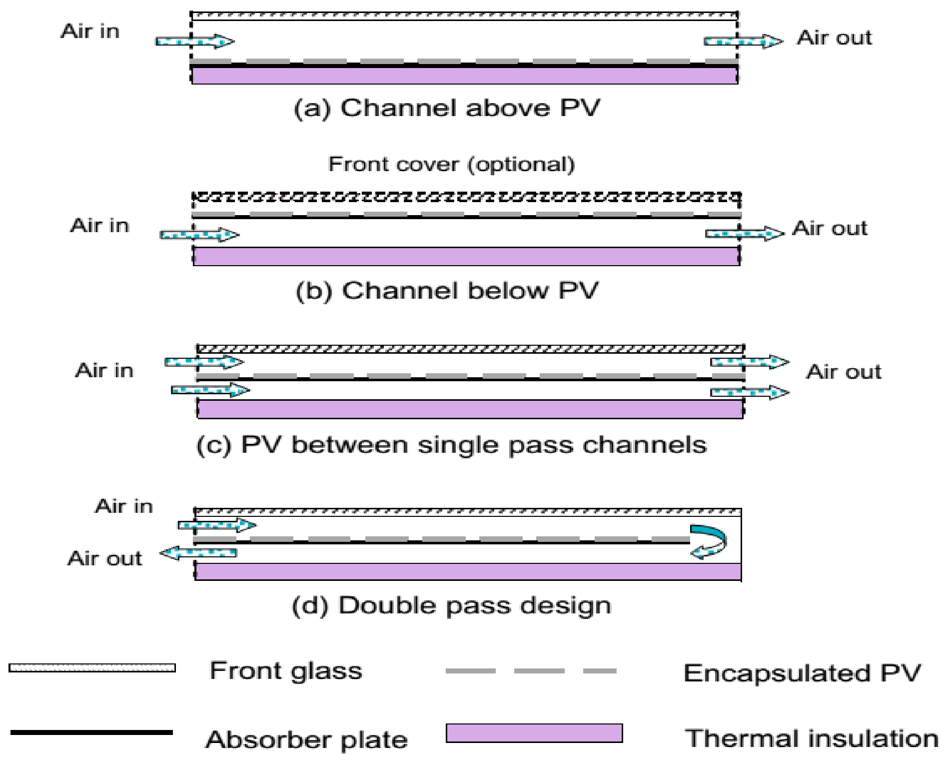


Figure 1- 18:Coupe longitudinale de certains modèles de capteurs PV/T courants.

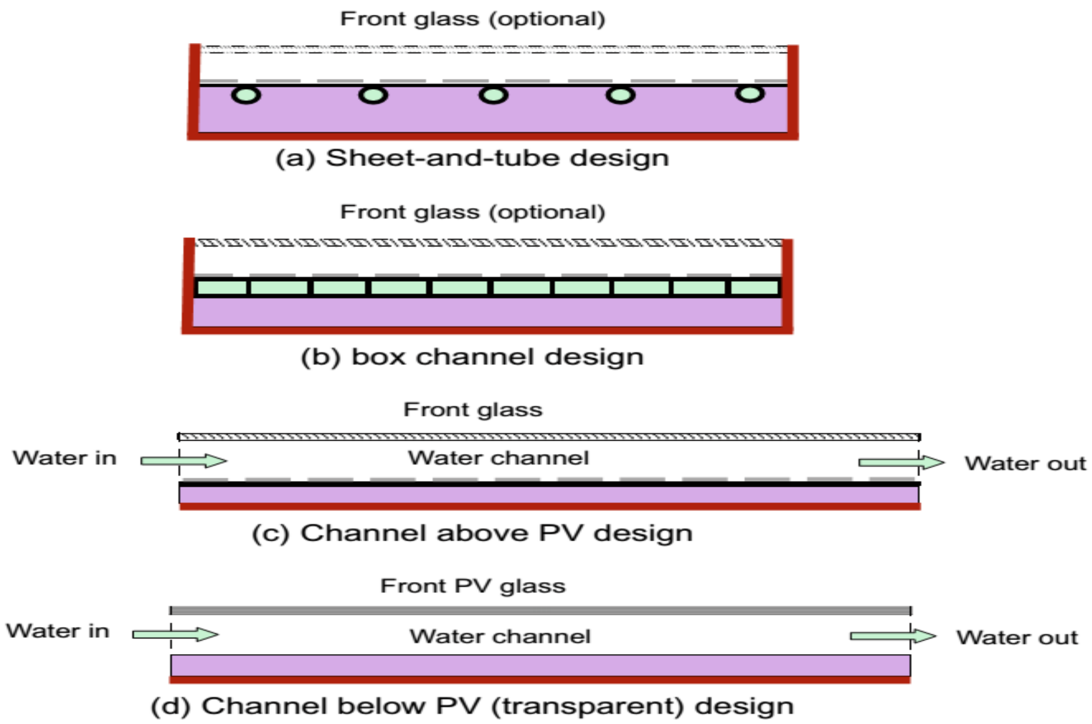


Figure 1- 19: Coupe transversale de certains modèles de capteurs PV/T courants.

1.6 Le spectre d'absorption du rayonnement solaire par l'eau :

La lumière que nous voyons tous les jours ne représente qu'une fraction de l'énergie totale émise par le rayonnement incident du soleil sur la terre. La lumière du soleil est une forme de "rayonnement électromagnétique" et la lumière visible que nous voyons est un petit sous-ensemble du spectre électromagnétique comme la montre la figure 1.21 ci-dessous.

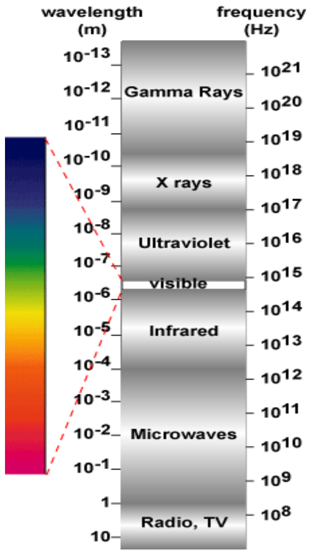


Figure 1- 20: Composition d'un spectre électromagnétique.

Il existe plusieurs caractéristiques clés de l'énergie solaire incidente qui sont essentiels pour déterminer comment la lumière solaire incidente interagit avec un convertisseur photovoltaïque ou tout autre objet. Les caractéristiques importantes de l'énergie solaire incidente sont :

- le contenu spectral de la lumière incidente ;
- la densité de puissance du rayonnement du soleil ;
- l'angle sous lequel le rayonnement solaire incident frappe un module photovoltaïque ;
- l'énergie rayonnante du soleil tout au long de l'année ou à la journée pour une surface particulière.

Le rayonnement solaire est absorbé par l'eau, mais cette absorption n'est pas égale pour toutes les composantes de la lumière. Le rayonnement infrarouge est absorbé dans la pellicule de surface de l'eau et sa pénétration se réduit à quelques millimètres. Le rouge-orangé ne pénètre pas au-delà des 5 m de profondeur. Le vert disparaît entre 30 et 50 m. C'est le bleu qui est le moins absorbé, et on estime qu'en dessous de 60 m, la vision est monochrome dans le bleu. L'extinction du rayonnement solaire est totale vers 400 m de profondeur [34]

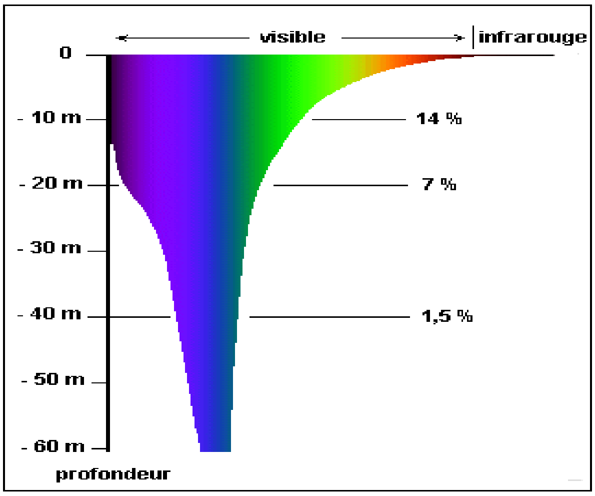


Figure 1- 21: Pénétration de la lumiére dans l'eau.

Les propriétés optiques de l'eau sont représentées sur la figure 1-22, superposées au spectre solaire. Dans [35] et [36], une analyse théorique et expérimentale pour différentes profondeurs d'eau, jusqu'à 50 cm, montre que l'eau absorbe fortement le rayonnement infrarouge, sans affecter notablement la conversion d'énergie puisque la conversion PV du silicium se situe principalement dans la région visible. Pour les applications TESPI dans lesquelles la profondeur de l'eau a été limitée à 2,5 cm, la Fig. 2 montre que, en considérant le spectre solaire à Masse d'Air égal à 1,5, l'énergie solaire absorbée est de 22,5%, mais le rendement PV ne baisse que de 3,1%. Le choix d'une couche mince est dû à la nécessité pratique de limiter le poids de l'eau superposée au panneau photovoltaïque et 2,5 cm semble être un bon compromis entre trois exigences: poids limité, absorption infrarouge élevée, circulation facile pour extraire la chaleur produite.

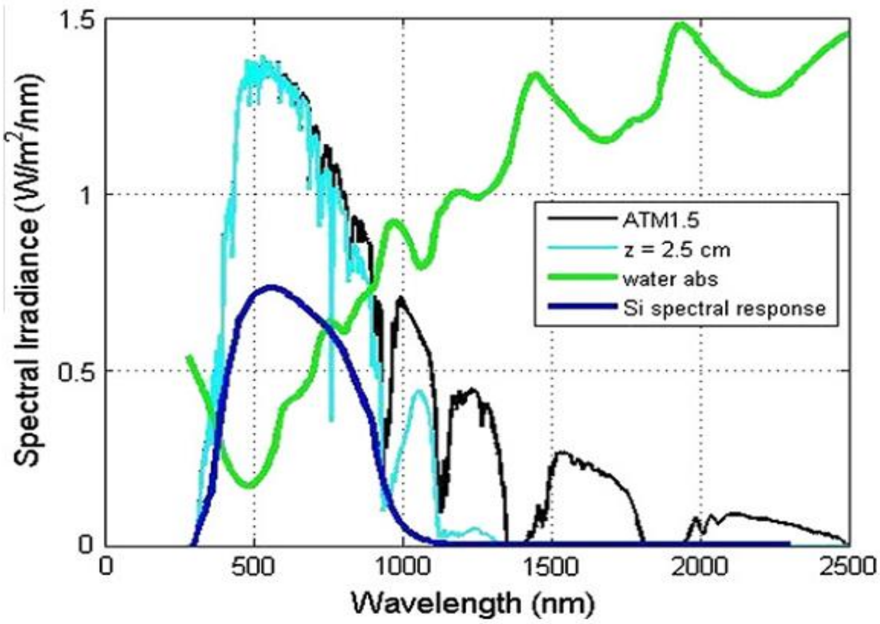


Figure 1- 22: L'absorption du spectre solaire par l'eau en fonction de la longuer d'onde.

1.7 Le spectre d'absorption du rayonnement solaire par la cellule photovoltaïque :

Pour qu'un électron de semi-conducteurs à se déplacer dans un circuit de charge externe, son niveau d'énergie doit être augmenté à son niveau de valence normale (étroitement lié à un atome) à son niveau de conduction d'énergie plus élevée (libre de se déplacer). La quantité d'énergie pour le stimuler au niveau supérieur est appelée énergie de "gap". Seuls les photons avec au moins l'énergie de gap pourront libérer des électrons pour créer un courant. Les photons de la lumière du soleil avec moins de l'énergie de gap vont tout simplement passer à travers la cellule solaire. En termes de rayonnement, tous les photons dans le spectre visible sont assez forts pour provoquer les électrons pour sauter la bande interdite. Certains infrarouge, tous les micro-ondes, et toutes les ondes radio ne disposent pas assez d'énergie et de passer à travers la cellule solaire. Dans la "distribution d'énergie de la lumière du soleil" la figure au-dessous, seule la moutarde de couleur photons peuvent être «absorbée» et créer de l'électricité dans une cellule de silicium cristallin. L'absorption du rayonnement électromagnétique est le processus par lequel l'énergie d'un photon du soleil est transformée en d'autres formes d'énergie, par exemple l'électricité ou de la chaleur. Les longueurs d'onde de couleur rouge n'ont pas assez d'énergie et les jaunes ont trop d'énergie. Les longueurs d'onde jaunes sont absorbés et produisent de l'électricité, mais beaucoup de leur énergie est perdue. C'est parce que les photons avec l'énergie de la bande interdite en excès génèrent un électron libre et un trou, mais leur énergie supplémentaire est dissipée sous forme de chaleur. Les rayons X et les rayons gamma ont tout simplement trop d'énergie pour être absorbé. La zone moutarde est essentiellement une image de la limite SQ comme calculées par [37] appliquée au silicium.

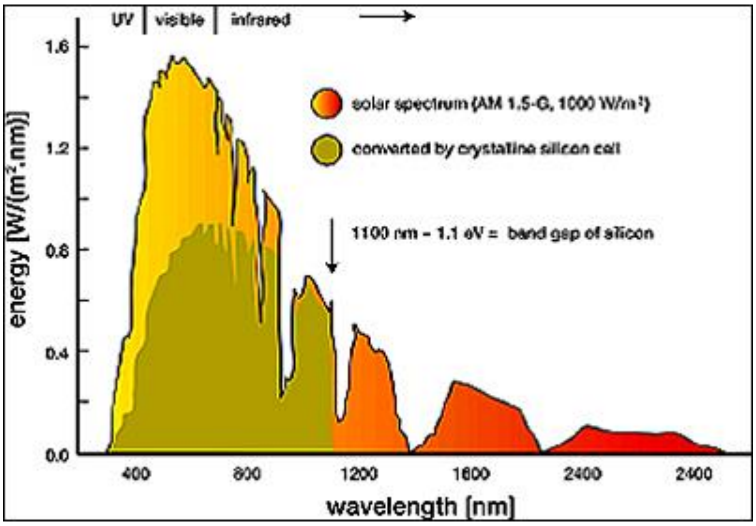


Figure 1- 23:Absorption de la lumiére par les cellules de Silicium.

Conclusion :

De l'aperçu ci-dessus, on peut conclure que: premièrement, les capteurs PV/T à plaques planes sont l'option la plus prometteuse dans la technologie des collecteurs hybrides thermique/photovoltaïque en raison de leur simplicité de conception, de leur faible coût et de leur application facile. Deuxièmement, la plupart des recherches sur le système PV/T ont été menées pour évaluer ses performances et l'optimisation de la configuration géométrique du capteur thermique, l'accent étant principalement mis sur les effets des paramètres de contrôle du système. Bien que certaines de ces recherches aient inclus une validation expérimentale, la simulation numérique est toujours considérée comme la technique efficace et pratique pour explorer le phénomène complexe du transfert de chaleur conjugué et le mécanisme d'écoulement de fluide correspondant. Cependant, la revue de la littérature montre que la plupart des études numériques réalisées jusqu'à présent sont unidimensionnelles ou bidimensionnelles. Il est par conséquent important de proposer un modèle tridimensionnel (3D) pour décrire ces systèmes énergétiques complexes. Un modèle mathématique tridimensionnel et les simulations numériques sont très importants pour prédire les paramètres de performance avec une précision de calcul élevée, ce qui est important pour concevoir et mettre en place l'approche expérimentale. D'autre part, la justification expérimentale d'un tel modèle 3D de conception géométrique particulière, pourrait établir le modèle comme un standard afin de comparer ces performances aux autres conceptions complexes. Cela réduirait le besoin d'expérimentation supplémentaire pour l'évaluation des performances des nouvelles conceptions.

Chapitre II

L'analyse energétique et exergétique d'un système PV

Introduction :

Comme proposé par [25], lorsque le but d'une étude est d'optimiser un système énergétique hybride délivrant différentes formes d'énergie comme c'est le cas du (PV/T) hybride, il est plus logique de considérer simultanément les première et deuxième lois de la thermodynamique, ou en d'autres termes, l'analyse énergétique et exergétique, respectivement. Cette approche est adoptée dans le présent travail de thèse.

2.1 Analyse énergétique :

Les modèles permettent d'exprimer de manière explicite les différentes valeurs de courants et tensions en fonction de la température du panneau et de l'ensoleillement ainsi que des données de manufacturiers. Il est également très utile pour l'élaboration du modèle exergétique.

L'énergie thermique extraite par l'eau de refroidissement est définie par :

$$E_{th} = \dot{m}C_{pw}(T_{out} - T_{in}) \qquad \textbf{Eq 2. 1}$$

où le débit massique est calculé par l'équation suivante :

$$\dot{m} = \rho_w U_0 S_{ch} \qquad \textbf{Eq 2. 2}$$

Où S_{ch} est l'aire de la section transversale du canal rectangulaire. Le nombre de Reynolds est calculé par les formules suivantes en considérant que la vitesse moyenne sur la section transversale du canal rectangulaire est égale à l'entrée U_0 puisque l'écoulement est pleinement développé;

$$Re = \frac{U_0 D_h}{\upsilon_w} \qquad \textbf{Eq 2. 3}$$

υ_w est la viscosité cinématique de l'eau, D_h est le diamètre hydraulique et est donné par:

$$D_h = \frac{4S_{ch}}{P_{ch}} = \frac{2L\delta}{L+\delta} \qquad \textbf{Eq 2. 4}$$

P_{ch} est le périmètre du canal.

L'efficacité électrique (η_{el}) est calculée par l'équation suivante [38].

$$\eta_{el} = \eta_{ref}\left[1 - \beta_{ref}\left(T_{cell} - T_{ref}\right)\right] \qquad \textbf{Eq 2. 5}$$

où η_{ref} est le rendement de référence dans des conditions standard (G_T = 1000W/m^2 et T_{ref} = 25°C), β_{ref} est le coefficient thermique du rendement de la cellule qui dépend des matériaux du module PV, ici la valeur est prise 0,0045 / K pour cellule de silicium [39]. L'efficacité électrique du PV peut également être exprimée comme ci-dessous :

$$\eta_{el} = \frac{V_{mp} I_{mp}}{E_c}$$ **Eq 2. 6**

où V_{mp} et I_{mp} sont respectivement la tension et le courant au point de puissance maximale.

Le rendement thermique est calculé par l'équation suivante :

$$\eta_{th} = \frac{E_{th}}{E_c}$$ **Eq 2. 7**

Dans l'équation 2.7, la quantité *E*c représente l'énergie totale (irradiance solaire) absorbée par le module PV; elle peut être calculée comme :

$$E_c = P_c \tau_g \alpha_c R A_c$$ **Eq 2. 8**

L'efficacité totale du collecteur PVT est calculée comme suit:

$$\eta_{tot} = \frac{E_{th} + E_{el}}{E_c}$$ **Eq 2. 9**

où la quantité totale d'énergie absorbée par les cellules PV qui est convertie en énergie électrique peut être écrite comme suit:

$$E_{el} = \overline{\eta_{el}} E_c$$ **Eq 2. 10**

2.2 Analyse exergétique :

L'exergie permet de caractériser simultanément les aspects quantitatif et qualitatif de l'énergie et représente la capacité d'un système à effectuer un travail dans un environnement donné. La qualité est exprimée à partir de la deuxième loi de la thermodynamique ; elle est associée au concept d'entropie et d'irréversibilités lors de la transformation ou de l'utilisation de l'énergie. Elle est évaluée par rapport à un environnement de référence qui peut être considéré comme libre d'irréversibilités et dont les propriétés sont uniformes. Lié au concept d'exergie, le terme d'anergie représente la portion d'énergie qui ne peut pas être convertie en travail. Ces différentes définitions sont représentées à la Figure 2.1 pour le cas d'une machine thermique typique.

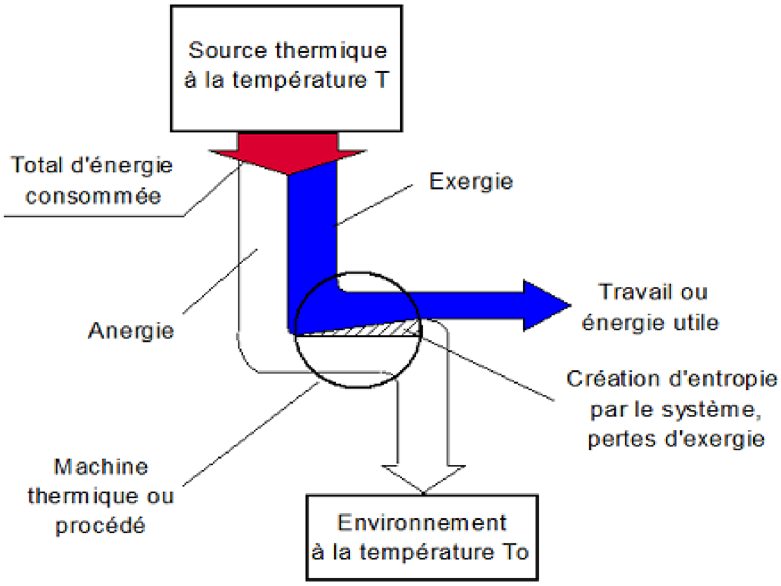


Figure 2- 1 : les notions d'exergie et d'anergie-schéma simplifié.

L'éxergie totale de l'écoulement d'un fluide est déterminé à partir de la somme des termes physique, cinétique (*ke*), potentiel (*pe*) et chimique (*ce*) :

$$\dot{E}x = \left[\left(\dot{H} - \dot{H}_0\right) - T_0\left(\dot{S} - \dot{S}_0\right)\right] + \dot{E}x_{ke} + \dot{E}x_{pe} + \dot{E}x_{ce}$$ **Eq 2. 11**

où H et S sont l'enthalpie et l'entropie par unité de temps et l'indice 0 réfère à l'environnement de référence. Tandis que l'exergie chimique $E\ xce$ fait intervenir les potentiels chimiques et les fractions molaires, l'exergie cinétique, comme potentielle, est une puissance mécanique et correspond directement à la puissance cinétique (potentielle) elle-même ; ils correspondent directement au travail disponible. Toutefois, ce n'est pas le cas de l'exergie physique qui évalue le potentiel thermodynamique du fluide par rapport à l'environnement de référence et ainsi, exprime explicitement la création d'entropie. Par conséquent, l'exergie revient en d'autres mots à associer un facteur de qualité à chaque terme d'énergie.Par conséquent, l'exergie revient en d'autres mots à associer un facteur de qualité à chaque terme d'énergie. Ainsi, l'exergie de la chaleur correspond à un moteur Carnot installé entre une source de chaleur et l'environnement de référence ; de la même manière, l'exergie de l'électricité correspond déjà au maximum et son facteur de qualité est égal à 1 (ou 100%). Autrement dit :

$$\dot{E}x_Q = \dot{Q}\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) = \dot{Q}\,\theta$$ **Eq 2. 12**

$$\dot{E}x_w = \dot{W}$$ **Eq 2. 13**

L'analyse exergétique est impérative chaque fois qu'un système délivre différentes formes d'énergie qui n'ont pas forcément la même qualité, bien qu'elles soient mesurables avec la même unité (Joule). Le collecteur hybride PVT produit deux formes d'énergie: l'électricité et la chaleur. Comparée à l'énergie thermique, l'électricité n'est pas seulement «plus utile», mais lorsqu'elle se transforme en travail; il est également totalement indépendant des conditions ambiantes. Cependant, comme on le verra plus tard, il est important de noter que l'efficacité exergétique de la conversion électrique dépend plutôt des conditions ambiantes (température ambiante) car elle est reliée à l'exergie du soleil.

L'exergie est donc définie comme le travail obtenu par transformation énergétique. On observe que sur la base de la deuxième loi de la thermodynamique, l'énergie électrique est égale à son exergie. En revanche, l'énergie thermique n'est transformée en travail qu'à travers un cycle de Carnot. L'exergie obtenue est donc égale à l'énergie thermique multipliée par un facteur inférieur à 1, soit: (1- T_{amb}/T_{out}) Les sorties d'exergie sont liées aux sorties d'énergie comme suit:

$$\dot{E}x_{pv} = \dot{E}_{pv}$$ **Eq 2. 14**

$$\dot{E}x_{th} = \dot{E}_{th}\left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{out}}\right)$$ **Eq 2. 15**

Pour étudier les performances d'un système PVT hybride du point de vue de la deuxième loi de la thermodynamique, des conditions quasi-stationnaires sont supposées et un bilan exergétique est appliqué à un volume de contrôle représentant le système PVT. Le bilan exergétique d'un système PVT est exprimé par [40] :

$$\sum \dot{E}x_{in} = \sum \dot{E}x_{out} + \sum \dot{E}x_{dest}$$ **Eq 2. 16**

où $\sum Ex_{in}$ $\sum Ex_{out}$,et $\sum Ex_{dest}$ sont respectivement l'exergie d'entrée, l'exergie de sortie et la perte ou la destruction d'exergie due à l'irréversibilité.

Dans les systèmes solaires tels que le PVT, l'énergie d'entrée est double: le rayonnement solaire qui atteint le système et également l'énergie dynamique du flux d'eau. Du point de vue exergie, seule l'exergie solaire est considérée comme valeur d'entrée pour le capteur PVT, car l'exergie du débit massique d'eau est négligée. Par conséquent, l'exergie d'entrée est:

$$\sum \dot{E}x_{in} = \sum \dot{E}x_{sun}$$ **Eq 2. 17**

L'exergie de l'irradiation solaire $\sum Ex_{sun}$ peut être calculée par différentes méthodes et équations. Parmi ceux-ci, les trois plus couramment utilisés sont ceux proposés respectivement par [41], [42] et [43]:

$$\dot{E}x_{sun} = \dot{E}_{sun}\left[1 - \frac{4T_{amb}}{3T_{sun}} + \frac{1}{3}\left(\frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right)^4\right]$$ **Eq 2. 18**

$$\dot{E}x_{sun} = \dot{E}_{sun}\left[1 - \frac{4T_{amb}}{3T_{sun}} + \frac{1}{3}\right]$$ **Eq 2. 19**

$$\dot{E}x_{sun} = \dot{E}_{sun}\left[1 - \frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right] = G_T\left[1 - \frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right]$$ **Eq 2. 20**

T_{sun} étant la température de surface du soleil, qui est d'environ égal à 5770 K. Selon [25], la différence entre ces équations est inférieure à 2%; par conséquent, dans la présente analyse, la forme la plus simple proposée par Jeter (Eq. 3.20) sera utilisée.

Les efficacités d'exergie ou efficacité de deuxième loi pour l'électrique (PV) et l'énergie thermique sont données respectivement comme:

$$\varepsilon_{pv} = \frac{\dot{E}x_{pv}}{\dot{E}x_{sun}}$$

$$= \tau_g \alpha_c \left[\frac{\int_{\lambda=390\ nm}^{\lambda=750\ nm} G(\lambda,0)e^{-W_{Abs}(\lambda)H} d\lambda}{G_T\underbrace{\left[1 - \frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right]}_{max}} + \frac{\int_{\lambda=750\ nm}^{\infty} G(\lambda,0)e^{-W_{Abs}(\lambda)H} d\lambda}{G_T\underbrace{\left[1 - \frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right]}_{min}}\right]$$

$$= \frac{\eta_{pv}}{\left[1 - \frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right]}$$ **Eq 2. 21**

$$\varepsilon_{th} = \frac{\dot{E}x_{th}}{\dot{E}x_{sun}} = \frac{\dot{E}_{th}\left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{out}}\right)}{G_T\left[1 - \frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right]} = \frac{\dot{m}C_{pw}(T_{out} - T_{in})\left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{out}}\right)}{A_c G_T\left[1 - \frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right]}$$

$$= \eta_{th}\frac{\left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{out}}\right)}{\left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right)}$$ **Eq 2. 22**

L'efficacité exergétique globale du collecteur hybride PVT est :

$$\varepsilon_{pvt} = \varepsilon_{pv} + \varepsilon_{th} = \frac{\eta_{pv}}{\left[1 - \frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right]} + \eta_{th}\frac{\left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{out}}\right)}{\left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right)} = \frac{\eta_{pv} + \eta_{th}\left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{out}}\right)}{\left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right)}$$ **Eq 2. 23**

Il est intéressant de noter à partir de l'Eq 2.21 que le rendement exergétique du PV (ε_{pv}) est légèrement supérieur au rendement énergétique (η_{pv}), car il est divisé par le paramètre (1 – (T_{amb}/T_{sun}))qui est inférieur à 1. Cependant, [25] parce qu'ils négligent le rapport (T_{amb}/T_{sun}), trouvent donc que le rendement exergétique du PV est égal à son rendement énergétique; $\varepsilon_{pv} = \eta_{pv}$.

D'autre part, l'efficacité de l'exergie thermique (ε_{th}) donnée par Eq.2.22 est bien inférieure à l'efficacité énergétique. En effet, le rapport (T_{amb}/T_{out}) étant proche de 1, multiplier η_{th} par (1 – (T_{amb}/T_{out})) donne une valeur assez faible de ε_{th} par rapport à η_{th}; cette observation est en accord avec la deuxième loi de la thermodynamique.

Conclusion :

Deux analyses ont été adoptées dans le présent travail de thèse : l'analyse energétique et exergétique, respectivement. L'utilisation des ces deux analyses est quasi incontournable dans le cas des systèmes énergétiques produisant plus d'une forme d'énergie, ce qui est justement le cas du collecteur hybride photovoltaique/thermique dit PVT pris comme cas d'étude dans ce travail de recherche doctorale. .

CHAPITRE III

MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU NOUVEAU CAPTEUR HYBRIDE (PV/T) À EAU

Introduction :

Le but du présent travail de doctorat est de concevoir une nouvelle configuration d'un capteur solaire hybride (PV/T) où le canal de refroidissement est situé au-dessus du panneau photovoltaïque (PV), de le modéliser et le simuler numériquement. Pour valider les résultats du présent travail numérique, une comparaison avec un cas d'étude de Nahar *et al*.[44] est proposée. L'étude de Nahar *et al*. [44], consiste en une modélisation et une simulation numérique en plus d'une validation expérimentale. Ce qui distingue cette étude parmi toutes celles qui ont été faites sur les (PV/T), est qu'il s'agit de l'une des rares (si on exclue la toute récente de [45], où des mini-canaux en aluminium sont utilisés pour refroidir les cellules PV) ayant une certaine similitude avec la présente recherche. En effet, Nahar *et al*. [44] ont utilisé un seul canal de refroidissement de section droite rectangulaire pour refroidir le panneau photovoltaïque. Ce chapitre présente donc les équations gouvernantes avec les conditions aux limites associées pour la simulation du (PV/T), mais aussi les deux analyses énergétique (basée sur la première loi de la thermodynamique) et exergétique (basée sur la seconde loi de la thermodynamique), respectivement, avec toutes les équations correspondantes appliquées au collecteur solaire hybride (PV/T) proposé.

3.1 Modélisation mathématique et simulation numérique :

L'objectif fondamental de l'ingénierie est de concevoir des dispositifs, des processus et des systèmes. Les modèles mathématiques représentent le comportement d'un appareil, d'un processus ou d'un système physique réel sous une 'formulation mathématique'. La modélisation mathématique est un processus structuré qui suit des méta-principes logiques particuliers. Les étapes de la modélisation comprennent la reconnaissance du besoin du modèle et l'identification des informations à rechercher, la collecte des informations disponibles, l'identification des circonstances et de la loi physique applicable, la construction des équations, l'authentification du modèle par la validation et la vérification de l'aspect pratique du modèle. Comme le plus souvent tous les processus sont complexes avec des couplages de différents phénomènes physiques 3D en régime transitoire, une solution analytique est quasi-impossible à obtenir; on a recours donc à une solution dite numérique réalisée par le biais de logiciels ultra performants comme c'est le cas de ANSYS FLUENT utilisés.

1. Maillage :

La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD, vu son influence sur la solution calculée. Un maillage de très bonne qualité est essentiel pour l'obtention d'un résultat de calcul précis, robuste et signifiant. La qualité du maillage a un sérieux impact sur la convergence, la précision de la solution et surtout sur le temps de calcul. Une bonne qualité de maillage repose sur la minimisation des éléments présentant des « distorsions » (skewness en anglais), et sur une bonne « résolution » dans les régions présentant un fort gradient (couches limites, ondes de choc, . . .).

Le domaine de calcul est défini par un maillage qui représente le fluide et les faces solides qui interviennent.

1.2 Choix du type de maillage :

Il existe trois types de maillage : structuré, non structuré et hybride (voir figure.3.1) ;

a. ***Maillage structuré (quadra/hexa)*** **:**

Un maillage structuré est un maillage qui peut être généré en reproduisant plusieurs fois une maille élémentaire. Dans ce type de maillage, tout nœud peut être repéré par un doublet ou un triplet (i, j, k). Le maillage structuré tire profit de de la numérotation et la topologie est implicite (stockage quasi-nul). En 2D, les éléments sont des quadrilatères, en 3D ce sont des hexaèdres. Il présente les avantages suivants :

- Economique en nombre d'éléments, présente un nombre inférieur de mailles par rapport à un maillage non structuré équivalent.
- Lorsque l'écoulement moyen est aligné avec le maillage, un maillage structuré réduit les risques d'erreurs numériques.

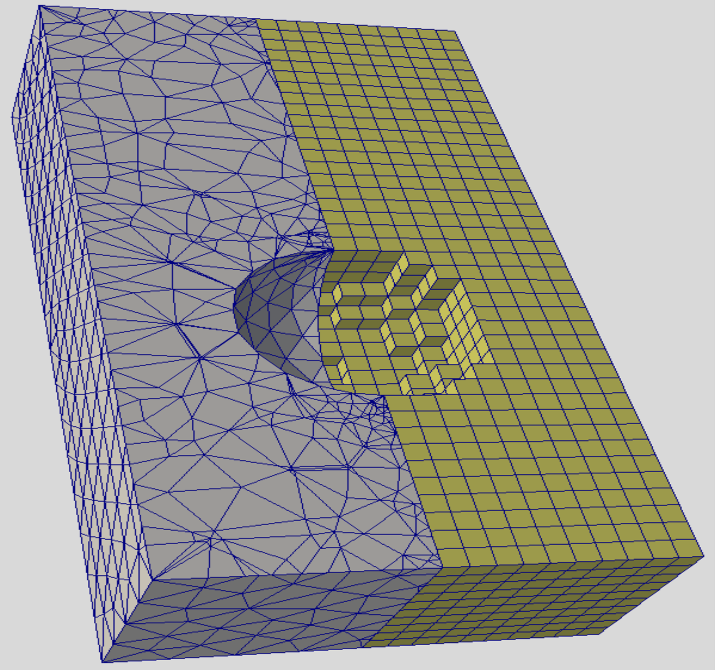


Figure 3- 1: Model de maillage structuré et non structuré.

Ses inconvénients :

- ✓ Difficile à générer dans le cas d'une géométrie complexe.
- ✓ Difficile d'obtenir une bonne qualité de maillage pour certaines géométries complexes.

b. Maillage non structuré (tri/tétra) :

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte par rapport à leur disposition. Ses avantages :

- ✓ Peut-être généré sur une géométrie complexe tout en gardant une bonne qualité des éléments,

- ✓ Les algorithmes de génération de ce type de maillage (tri/tétra) sont très automatisés.

Ses inconvénients :

- ✓ Très gourmand en nombre de mailles comparativement au maillage structuré.
- ✓ Impose une structure de données gourmande en capacités de stockage.
- ✓ Engendre des erreurs numériques (fausse diffusion) qui peuvent être plus importantes si on le compare avec le maillage structuré.

c. *Maillage hybride :*

Maillage généré par un mélange d'éléments de différents types, triangulaires ou quadrilatéraux en 2D, tétraédriques, prismatiques, ou pyramidaux en 3D. Il combine les avantages des maillages structurés et non structurés.

3.2. Proposition du nouveau capteur hybride photovoltaïque /thermique (PV/T) à base d'eau:

Comme expliqué en détail au chapitre 1, la plus grande partie du rayonnement solaire absorbé par les cellules solaires n'est pas convertie en électricité et accroît par conséquent leur température, entraînant ainsi une baisse de leur rendement électrique.

Le schéma d'un capteur hybride à base d'eau (PV/T) avec le panneau PV inséré au bas d'un capteur solaire à absorption directe (DASC) est présenté sur la figure 3.2. Il contient l'eau qui coule à l'intérieur d'un canal rectangulaire. La hauteur (H) du canal est considérée comme une variable; cependant, la longueur et la largeur sont égales à ceux du panneau PV sélectionné. La paroi supérieure du canal de refroidissement est un verre avec une transmissivité de 90%, et sur la paroi inférieure ($y = H$) le panneau PV est inséré. L'arrière du panneau PV est supposé être isolé (adiabatique). Le rayonnement thermique solaire incident frappe le collecteur dans la direction verticale (direction y) et ne se propage pas dans les autres directions (c'est-à-dire $q = q(y)$). Il est transmis à travers le verre et absorbée volumétriquement par l'eau. Le rayonnement absorbé crée une génération de chaleur volumétrique et l'eau est supposée être un fluide isotrope monophasé. Sur la figure 3.3, le processus d'absorption du rayonnement solaire dans le nouveau collecteur (PV/T) hybride est montré. Le rayonnement solaire passe par la surface supérieure de la plaque de verre avec tout le spectre, c'est-à-dire les longueurs d'onde UV, visible et infrarouge, respectivement. Il traversera le verre et pénétrera dans la couche d'eau de refroidissement. En fonction de la hauteur du canal de refroidissement (ou de l'épaisseur de la couche d'eau), une partie du rayonnement infrarouge sera absorbée par l'eau, tandis que tout le spectre visible passera et atteindra le panneau photovoltaïque. La cellule solaire absorbe ce rayonnement visible et génèrera un courant électrique.

Le modèle de transfert de chaleur tridimensionnel (3D) a été développé et résolu pour prédire numériquement les performances thermiques et électriques du collecteur hybride (PV/T). Sur la base d'une étude numérique validée expérimentalement (méthode des différences finies), [46] ont constaté que le modèle en régime permanent (3D) du (PV/T) donne les mêmes résultats qu'un modèle transitoire (3D). De plus, [44] ont obtenu un très bon accord entre un modèle

numérique au régime permanant (3D) (méthode des éléments finis) et leurs mesures expérimentales. Par conséquent, les études de [46] et[44] justifient le choix pour la présente étude numérique d'un modèle tridimensionnel en régime permanent.

Les hypothèses suivantes sont utilisées:

• On suppose un état quasi stationnaire. Cela signifie que dans une période de 15 min, la variation de l'irradiation solaire est négligeable et peut être considéré comme constant.

• La Transmissivité de l'acétate d'éthyle vinyle (EVA) est d'environ 100%,

• Aucune poussière sur la surface n'affectera l'absorption de l'énergie solaire,

• Le flux est considéré comme stable, incompressible, laminaire et pleinement développé,

• Les propriétés thermophysiques de l'eau sont isotropes et dépendent de la température.

• La face inférieure du panneau PV est supposée être adiabatique,

• Les résistances d'interface sont négligées.

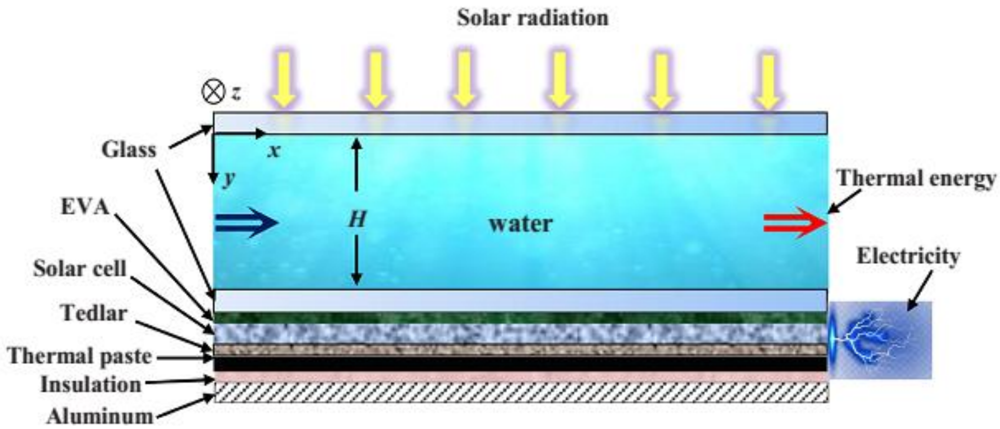


Figure 3- 2:La vue en coupe du nouveau capteur solaire hybride (PV/T) à base d'eau.

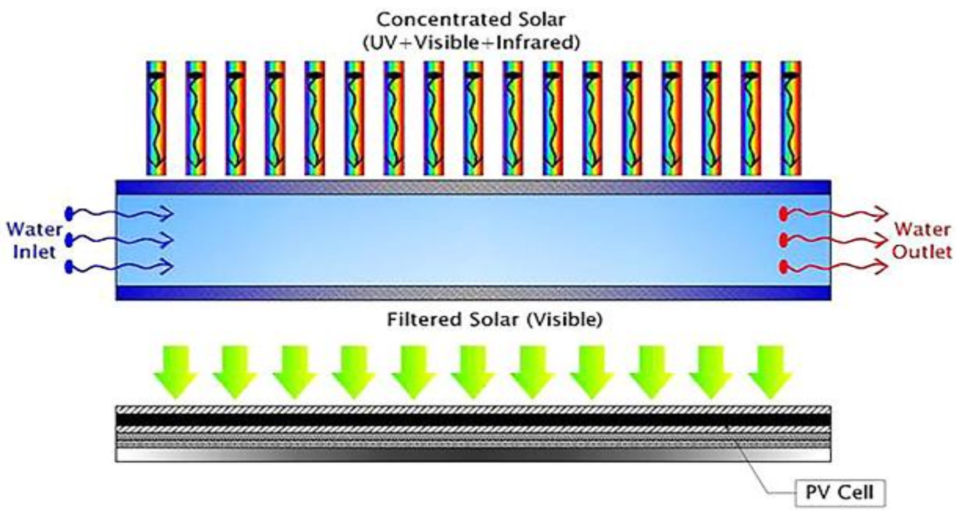


Figure 3- 3 : Le processus d'absorption du rayonnement solaire dans le nouveau capteur hybride (PV/T) à base d'eau.

3.3 Simulation du nouveau (PV/T) par Ansys-Fluent :

3.3.1 Présentation du capteur:

Le nouveau collecteur solaire hybride photovoltaïque/thermique (PV/T) proposé dans ce travail de thèse de doctorat (voir la figure 4.2 ci-dessus), se compose d'un panneau PV typique couplé à un capteur solaire thermique fixé à sa face arrière. La structure de base du (PV/T) comprend neuf couches, à savoir: le verre, le canal où circule l'eau de refroidissement placée au-dessus du PV avec deux plaque planes parallèles en verre, une couche de fluide caloporteur (eau), le panneau photovoltaïque à base de cellules de silicium polycristallin, l'acétate d'éthyle vinyle (EVA) comme encapsulant, poly fluorure de vinyle (PVF) ou Tedlar, une pâte thermique et une couche d'isolant, et enfin une couche d'aluminium. La section transversale des couches du (PV/T) est représentée par la figure 3.2 ci-dessous:

Quelques informations utiles concernant les différentes couches du (PV/T) sont données comme suit :

1. Couche de Verre :

La première couche du module (PV/T) est un couvercle de protection et avec la deuxième couche de verre elles forment le canal de refroidissement en verre trempé texturé à haute transmittance avec une transmissibilité maximale du rayonnement solaire d'environ 95%.

2. Couche de Fluide:

La couche du fluide de refroidissement du (PV/T) est une couche d'eau s'écoulant entre les parois du canal en verre. L'eau (et le nanofluide TiO_2 au chapitre VI) est considérée comme fluide de refroidissement du (PV/T).

3. Couche d'acétate de vinyle d'éthylène :

L'éthylène acétate de vinyle (EVA) est un copolymère transparent et brillant d'éthylène et d'acétate de vinyle utilisé pour encapsuler les cellules de silicium. Comme le couvercle en verre, l'EVA a également une transmittance optique élevée avec une capacité à résister aux rayons UV. L'encapsulation EVA empêche l'endommagement des cellules, le flambage du module a causé une différence entre le coefficient de dilatation thermique des différents matériaux du module. Cela évite également d'endommager les cellules solaires des effets néfastes de l'humidité et des températures élevées.

4. Couche de Cellules de Silicium Polycristallin :

Le silicium poly-cristallin (p-Si) est une forme poly-cristalline de haute pureté de silicium constituée de plusieurs petits cristaux connus sous le nom de cristallites. C'est la couche centrale d'un module PV dans laquelle la conversion d'énergie a lieu. Une petite partie (15 à 20%) du rayonnement solaire incident est convertie en électricité par effet photoélectrique et le reste est dissipé sous forme de chaleur.

5. Couche de Fluorure de Polyvinyle ou de Tedlar :

Le poly fluorure de vinyle (PVF) est un fluor polymère thermoplastique à motif répétitif de fluorure de vinyle. Ceci est largement connu sous le nom de Tedlar qui est en fait le nom commercial du film PVF produit par DuPontTM. Il possède une faible perméabilité aux vapeurs, une rigidité diélectrique élevée et peut résister aux intempéries et aux taches ou à l'abrasion. Le film Tedlar a une bonne adhérence. C'est pourquoi il est utilisé comme feuille arrière pour les modules PV.

6. Couche pate Thermique :

Une pâte thermo-conductrice est utilisée pour coupler le canal d'écoulement avec la surface arrière du module PV. Bien qu'elle ne soit pas aussi bonne que le cuivre, la pâte thermique est un adhésif thixotrope très conducteur de chaleur qui est utilisé entre deux objets pour assurer une meilleure conduction de la chaleur. Il existe trois types de pâtes thermiques; à savoir, pâte thermique à base de métal, à base de céramique et à base de silicium. Une pâte à base de silicium a été utilisée dans la présente étude.

7. Couche d'Aluminium :

La couche de l'aluminium est considérée comme le support des couches précédentes et le corps du panneau (PV/T). Dans les tableaux 3-(1, 2, 3, 4) ci-dessous, on trouve les données détaillées sur les matériaux des différentes couches du (PV/T), leurs dimensions et leurs propriétés thermophysiques. Ils sont tirés du travail de Nahar, Hasanuzzaman [44] et considérées comme des données d'entrée dans les simulations.

Tableau 3- 1: Matériaux de capteurs PV et propriétés thermophysiques

Matériaux	Couche	Densité $[kg/m^3]$	Conductivitéthermique $[W/(m.K)]$	Chaleur spécifique C_p $[J/(kg.K)]$	Epaisseur (mm)
Verre	Top cover	2450	2	500	3
EVA	Encapsulent	950	0.311	2090	0.8
Silicon	Solar cell	2329	148	700	0.1
Tedlar	Bottom cover	1200	0.15	1250	0.05
Pate thermique	Conductor	2600	1.9	700	0.3

Tableau 3- 2: Spécifications du collecteur thermique

Matériaux	**Dimension** (mm)	**Densité** $[kg/m^3]$	**Conductivitéthermique** $[W/(m.K)]$	**Chaleur spécifique C_p** $[J/(kg.K)]$	**Epaisseur** (mm)
Aluminium	1350x920x1	2700	160	900	1
Fluide	Eau	998	0.68	4200	

Tableau 3- 3 : Spécifications du module PV

Place of origin	**Malaysia**
Brand name	EPV
Model no	LB250QM-60
Materials	Polycrystalline silicon
Size	1570 x 940 mm
Size of a cell	153 x 153 mm
Area of a PV module	0.0234 $[m^2]$
Total Area of PV cell	1.4 $[m^2]$
Number of solar cells	6 x 10 = 60
Maximum power	250 W
Open circuit voltage (V_{oc})	37.8 V
Short circuit current (I_{sc})	8.73A
Voltage at P_{max}. (V_{mpp})	30.6 V
Current at P_{max}. (I_{mpp})	8.17A
Maximum system voltage	1000 V
Maximum series pause rating	10 A
Operating temperature	- 40 $°C$ to ±85 $°C$
Standard testing condition (STC)	1000 W/m^2, AM 1.5, 25 $°C$
Tolerance	±3%
Weight	20 kg

Les paramètres utilisés dans le model numérique sont tirés de ([44],[3]) sont donnés dans le tableau 3-4 ci-dessous :

Tableau 3- 4 : Paramètres de conception et paramètres physiques utilisés comme données d'entrée dans les simulations numériques.

Parameters	**Values**
The length of water duct	1350 mm
The width of the duct	920 mm
The duct depth	30 mm
Transmissivity of glass	0.9
PV cell efficiency at standard test conditions	0.13
Absorptivity of solar cell	0.9
Packing factor of solar cell	0.95
Irradiation	200 –1000 W/m^2
Ambient temperature	34 $°C$
Inlet velocity	0.0003–0.0007 m/s
Inlet temperature	34 $°C$
Absorptivity of tedlar	0.5
Conductive heat transfer coefficient from solar	66 W/m^2K

3.3.2 Equations gouvernantes :

Pour le calcul des distributions de la température tridimensionnelle, on utilise les hypothèses simplificatrices suivantes:

- On suppose un état quasi stationnaire. Cela signifie que dans une période de 15 min, la variation de l'irradiation solaire est négligeable et peut être considérée comme constante. Aucune poussière sur la surface n'affectera l'absorption de l'énergie solaire,
- La transmissivité de l'acétate d'éthyle vinyle (EVA) est d'environ 100%,
- Aucune poussière sur la surface n'affectera l'absorption de l'énergie solaire,
- L'écoulement du fluide est considéré permanent, incompressible, laminaire et totalement développé,
- Les propriétés thermophysiques de l'eau sont isotropes et dépendent de la température.
- La face inférieure du panneau PV est supposée être adiabatique,
- Les résistances d'interface sont négligées.

Compte tenu des hypothèses ci-dessus, les équations gouvernantes du transfert de chaleur dans les différentes couches du module PV/T sont données comme suit:

L'équation de continuité est :

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \quad \textbf{Eq 3. 1}$$

Considérant un écoulement laminaire incompressible, les équations régissant la quantité de mouvement pour l'écoulement d'eau dans le canal rectangulaire sont données comme suit:

Dans la direction *x* :

$$u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}=-\frac{1}{\rho_w}\frac{\partial P}{\partial x}+\vartheta_w\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)$$ **Eq 3. 2**

Dans la direction *y* :

$$u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}=-\frac{1}{\rho_w}\frac{\partial P}{\partial y}+\vartheta_w\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right)$$ **Eq 3. 3**

Dans la direction *z* :

$$\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}=-\frac{1}{\rho_w}\frac{\partial P}{\partial z}+\vartheta_w\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right)$$ **Eq 3. 4**

L'équation d'énergie est :

$$\rho_w C_{pw}\cdot\left(u\cdot\frac{\partial T(x,y,z)}{\partial x}+v\cdot\frac{\partial T(x,y,z)}{\partial y}+w\cdot\frac{\partial T(x,y,z)}{\partial z}\right)$$ **Eq 3. 5**

$$=k_w\left[\frac{\partial^2 T(x,y,z)}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T(x,y,z)}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T(x,y,z)}{\partial z^2}\right]-\frac{dq_{rad}}{dy}$$

oùυ_w, ρ_w, Cp_w et k_w sont les propriétés thermophysiques de l'eau (viscosité cinématique, densité, chaleur spécifique et conductivité thermique, respectivement). *u*, *v* et *w* étant les composantes de vitesse dans les directions *x*, *y* et *z*, respectivement. Le flux est considéré comme pleinement développé et le profil de vitesse dans un canal rectangulaire est donné par [47].

Si l'on prend en compte les dimensions réelles du canal rectangulaire (la longueur *L* et la largeur du canal rectangulaire *W* égales à celle du panneau PV), l'écoulement laminaire, permanent et totalement développé peut être simplifié davantage comme celui d'un écoulement entre deux plaques planes parallèles. Cette approche est adoptée dans leur modélisation du DASC par [48].

Dans tous les domaines solides du collecteur (PV/T), la conduction est considérée comme le mécanisme de transfert de chaleur à travers différentes couches, et les résistances d'interface sont supposées négligeables. L'équation de conduction thermique est:

$$\nabla\cdot(k\nabla T)=0$$ **Eq 3. 6**

3.3.3 Conditions aux limites:

Le traitement des conditions aux limites est très important en Mécanique des fluides et nécessite une attention particulière pour obtenir une solution correcte du problème. Des conditions aux limites appropriées ont été employées sur le domaine de calcul selon la physique du problème. Les conditions aux limites sont répertoriées comme suit:

- Dans le domaine fluide :

$$x = 0, \delta_g \leq y \leq H + \delta_g, 0 \leq z \leq W \Rightarrow T(0, y, z) = T_{in}, u = U_0$$
$$v = w = 0$$ **Eq 3. 7**

- La condition de non-glissement est appliquée à l'interface des parois-eau :

$$u = v = w = 0$$ **Eq 3. 8**

- À la sortie ($x = L$), la pression manométrique est considérée nulle :

$$P = P_0$$ **Eq 3. 9**

- Sur la surface supérieure du verre (interface verre-air)
  ($x \geqslant =0$, $y \geqslant =0$, $z \geqslant 0$)

Un bilan thermique de surface est appliqué et prend en compte la perte par convection et par rayonnement de la surface à l'environnement, en plus de la réflectivité du rayonnement solaire ($\rho_g \cdot G_T$) par la surface du verre et de la transmissivité à travers le verre ($\tau_g \cdot G_T$)

$$x \geq 0, y \geq 0, z \geq 0 \Rightarrow (1 - \tau_g - \rho_g) G_T$$
$$= h_{g-air}(T_g - T_{amb}) + \varepsilon_g \sigma_{SB}(T_g^4 - T_{sky}^4)$$ **Eq 3. 10**

ε_g et σ_{SB} sont respectivement l'émissivité de la surface du verre et la constante de Stefan Boltzmann.

- Aux interfaces entre l'eau et les surfaces de haut et de bas de plaque de verre:

($x \geqslant =0$, $y = \delta_g$et $y = H + \delta_g$, $z \geqslant 0$), le transfert de chaleur est de nature à convection forcée. Les radiations solaires atteignant les surfaces supérieure et inférieure du canal de refroidissement sont calculées à l'aide de l'Eq. 15 ci-dessous. Une fois que ces flux de chaleur sont calculés pour $y = \delta_g$ (haut) et $y = H + \delta_g$ (bas), les nombres de Nusselt pour la convection forcée sur les surfaces supérieure et inférieure, respectivement, peuvent être calculés en considérant un écoulement laminaire entièrement développé entre deux plaques soumises à deux flux thermiques constants mais différents à chaque paroi. Les équations pour calculer les nombres de Nusselt sont données comme suit:

$$Nu_{y=0} = \frac{140}{26 - 9\left(q_{y=H}/q_{=\delta g}\right)}, Nu_{y=H} = \frac{140}{26 - 9\left(q_{y=\delta_g}/q_{=H}\right)}$$ **Eq 3. 11**

Les deux coefficients de transfert de chaleur par convection forcée sont calculés à partir des nombres de Nusselt, et dans le logiciel ANSYS Fluent, ils seront utilisés comme conditions aux limites dans une boîte de conditions aux limites spéciale.

La condition aux limites adiabatique est considérée au bas du panneau PV et sur les parois latérales (c'est-à-dire $z = 0$ et $z = W$) du PVT (une isolation thermique est utilisée);

$$-n \cdot (-k\nabla T) = 0 \qquad \textbf{Eq 3. 12}$$

G_T est le rayonnement solaire total intégré sur tout le spectre et est considéré ici comme égal à 1000 W/m^2, qui est la valeur donnée par la norme ASTM G-173 pour un angle zénithal de 48,2° et un coefficient de masse d'air AM = 1,5 pour un air pur.

ε_g, σ_{SB} et T_{sky} sont respectivement l'émissivité de surface du verre, la constante de Stefan Boltzmann et la température du ciel. Pour le calcul de T_{sky}, plusieurs équations sont proposées, cependant, dans la présente recherche, la formule suivante de [49] où T_{sky} et T_{amb} sont en Kelvin est utilisée :

$$T_{sky} = 0.0552 \cdot T_{amb}^{1.5} \qquad \textbf{Eq 3. 13}$$

Selon [50] dans leur étude sur une feuille et tube PVT, la valeur de la puissance thermique et électrique du capteur est affectée de moins de 1% par la corrélation choisie pour le calcul de la température du ciel. Eq. (13) a été largement utilisé dans la littérature en ce qui concerne sa précision mais aussi sa simplicité car il ne nécessite aucune connaissance des températures du point de rosée ou de l'estimation de la couverture nuageuse.

Le coefficient de convection hg-air est modélisé avec une dépendance linéaire sur la plage des vitesses du vent [49] comme suit:

$$h_{g-air} = 2.8 + 3 \cdot V_{air} \qquad \textbf{Eq 3. 14}$$

V_{air} étant la vitesse du vent.

Une partie du flux de chaleur du rayonnement solaire est absorbée par l'eau et le flux de chaleur solaire en dessous d'une profondeur de couche d'eau y est calculé par l'équation suivante:

$$q_{rad}(y) = \int_0^{\infty} G(\lambda, y)d\lambda = \int_0^{\infty} G(\lambda, 0)e^{-w_{Abs}(\lambda)y}d\lambda \qquad \textbf{Eq 3. 15}$$

G (λ, y) est défini comme l'irradiance solaire spectrale sous une couche d'eau de profondeur y; cette quantité dépend du spectre d'absorption d'eau $W_{Abs}(\lambda)$ (généralement référencé a et donné en cm^{-1}, parfois tabulé aussi log (a)). G (λ, y) peut être calculé selon la loi de Lambert – Beer, comme suit:

$$G(\lambda, y) = G(\lambda, 0)e^{-w_{Abs}(\lambda)y}$$ **Eq 3. 16**

Le rayonnement solaire total G_T représentant l'irradiation solaire à y = 0 (à la surface supérieure de l'eau) est donné comme :

$$G_T = q_{rad}(y = 0) = \int_0^{\infty} G(\lambda, 0)d\lambda = \int_0^{\infty} G(\lambda, 0)d\lambda$$ **Eq 3. 17**

La dérivée de q_{rad} par rapport à y(dq_{rad} /dy) apparaissant dans la partie droite de l'équation d'énergie (Eq. 4.5), est calculée par l'Eq.4.18 ci-dessous. Elle représente l'énergie thermique absorbée par unité de volume (W/m^3):

$$\frac{dq_{rad}(y)}{dy} = -\int_0^{\infty} G(\lambda, 0)W_{Abs}(\lambda)e^{-W_{Abs}(\lambda)y}d\lambda = -\int_0^{\infty} G(\lambda. y)W_{Abs}(\lambda)d\lambda$$ **Eq 3. 18**

Les intégrations numériques d'Eqs. 15, 17 et 18 sont réalisées grâce à l'existence de valeurs expérimentales pour le spectre de l'irradiance solaire G (λ, 0) qui représente ATM 1,5 (spectre solaire à Air Mass égal à 1,5), qui est mis à disposition par le NREL (National Renewable Energy Lab, Golden, Co., USA) sous la norme ASTM G173-03 dérivée de SMARTS v. 2.9.2. Les données pour le spectre d'absorption d'eau $W_{Abs}(\lambda)$ sont mesurées par [51] sont également disponibles.

Pour ATM 1.5, l'intégration de Eq.17 donne G_T = 1000 W/m^2. La puissance thermique extraite par l'eau de refroidissement est donnée par:

$$E_{th}(W) = \dot{m}C_{pw}(T_{out} - T_{in})$$ **Eq 3. 19**

Le débit massique ṁ (kg / s) est calculé à l'aide de l'équation suivante:

$$\dot{m} = \rho_w U_0 S_{ch}$$ **Eq 3. 20**

où S_{ch} est l'aire de la section transversale du canal rectangulaire. Le nombre de Reynolds est calculé par les formules suivantes en considérant que la vitesse moyenne sur la section transversale du canal rectangulaire est égale à l'entrée U_0 puisque l'écoulement est pleinement développé;

$$Re = \frac{U_0 D_h}{\upsilon_w}$$ **Eq 3. 21**

υ_w est la viscosité cinématique de l'eau, D_h est le diamètre hydraulique et est donné par:

$$D_h = \frac{4S_{ch}}{P_{ch}}$$ **Eq 3. 22**

P_{ch} est le périmètre du canal.

Conclusion :

Dans ce chapitre III, une nouvelle configuration d'un capteur solaire hybride (PV/T) où le canal de refroidissement est situé au-dessus du panneau photovoltaïque (PV) est modélisée et simulée numériquement. Toutes les équations gouvernantes ainsi que les conditions aux limites sont écrites et justifiées. Comme la configuration du PVT est nouvelle et consiste à placer le canal de refroidissement à eau au-dessus du PV, une partie importante et qui concerne l'absorption du rayonnement solaire incident par la couche d'eau est proposée. La quantité d'énergie spectrale absorbée dépend donc de l'épaisseur de l'eau. Les détails concernant cette absorption spectrale sont bien expliqués; la compréhension du phénomène de quasi non absorption de la partie visible du spectre solaire à travers la couche d'eau est mise en évidence. De plus, aux interfaces entre l'eau et les surfaces de haut et de bas de plaque de verre, un traitement spécial pour déterminer les nombres de Nusselt est expliqué.

CHAPITRE IV

RÉSULTATS ET DISCUSSION SUR LE (PV/T) À EAU

Introduction :

Dans ce chapitre, les résultats des simulations numériques sont donnés avec des explications sur l'impact des paramètres intrinsèques et extrinsèques sur les efficacités énergétiques et exégétiques du collecteur hybride PVT à base d'eau avec canal de refroidissement placé au-dessus du PV. Comme validation, une comparaison est faite avec les travaux de Nahar *et al*. (2017).

4.1 Le maillage des (PV/T)

Le capteur solaire hybride (PV/T) à base d'eau de Nahar *et al*. (2017) est montré dans la figure 4.1 ci-dessous. Le maillage effectué par le logiciel ANSYS FLUENT utilise le paramètre de séquence de maillage contrôlé comme illustré dans les figures 4.2 .le nombre d'éléments de maillage augmente à chaque frontière afin que les champs de transfert de chaleur et d'écoulement puissent être résolus avec précision.

Le maillage sous ANSYS FLUENT du nouveau collecteur hybride (PV/T) à base d'eau constitué de différents matériaux maillé est donné par la figure 4.3. Les critères de convergence sont définis de telle sorte que les erreurs résiduelles pour les équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie se réduisent à moins de 10^{-5}. La plus grande précision des calculs est obtenue avec 247120 éléments de maillage.

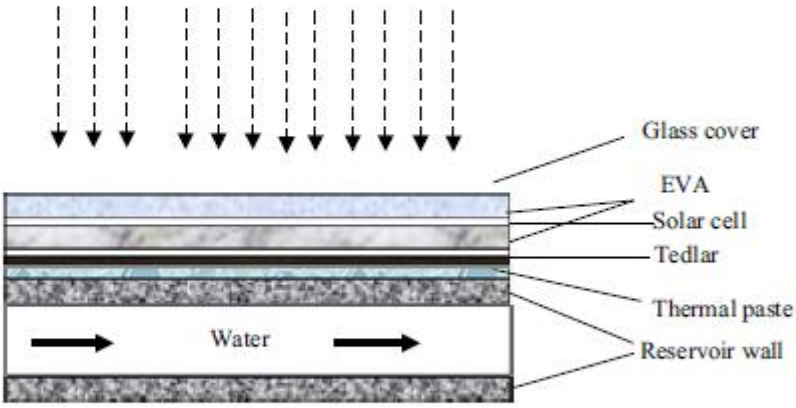


Figure 4- 1 : Coupe transversale du capteur solaire hybride (PV/T) proposé par Nahar et al. (2017).

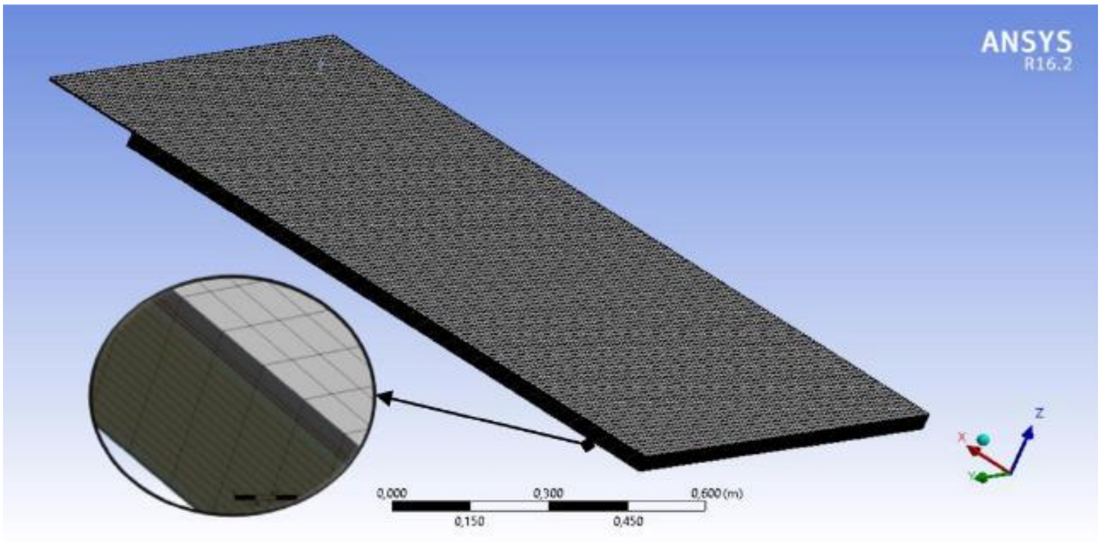


Figure 4- 2 :Maillage du capteur solaire hybride (PV/T) à base d'eau proposé par Nahar et al. (2017) sous ANSYS Fluent.

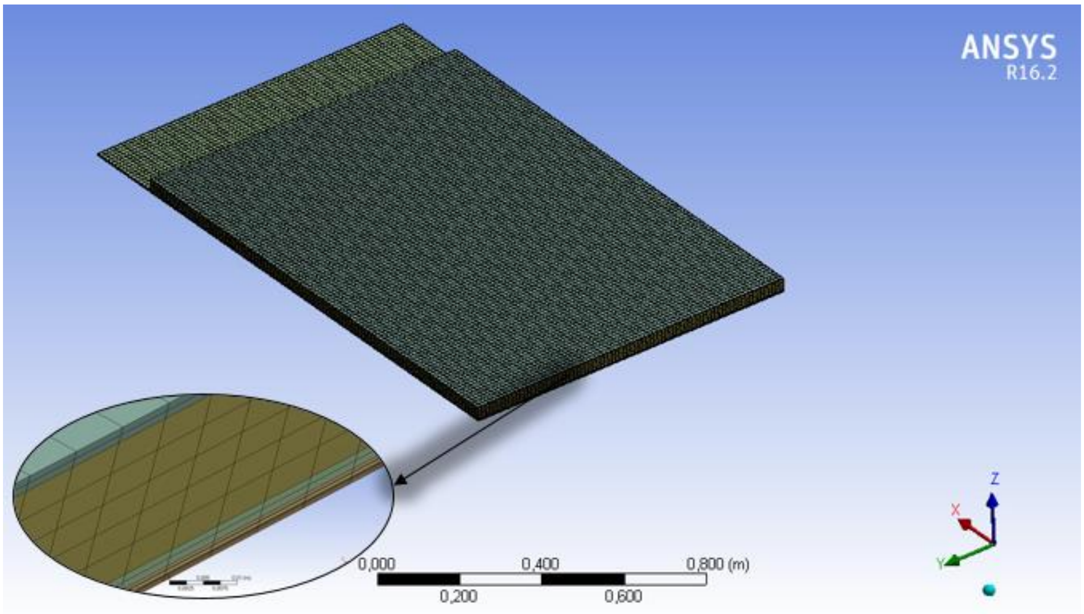


Figure 4- 3 :Maillage 3D pour la nouvelle configuration du (PV/T) à base d'eau sous ANSYS FLUENT.

Afin d'évaluer les valeurs des performances énergétiques (1-ère loi de la thermodynamique) et exergétiques (2-ème loi de la thermodynamique) globales du nouveau capteur hybride (PV/T) proposé, on considère également dans nos simulations le même module PV utilisé par Nahar *et al*. dans leurs travaux expérimentaux et numériques. Ainsi, les données des tableaux 3.1, 3.2, 3.3 et 3.4 sont utilisées comme données d'entrées.

4.2 Validation du model numérique :

Pour pouvoir valider le model numérique, on doit faire des comparaisons entre les résultats numériques du model que nous avons conçu par ANSYS FLUENT et les valeurs numériques et expérimentales tirées du travail de [44]. Les résultats sont présentés ci-dessous.

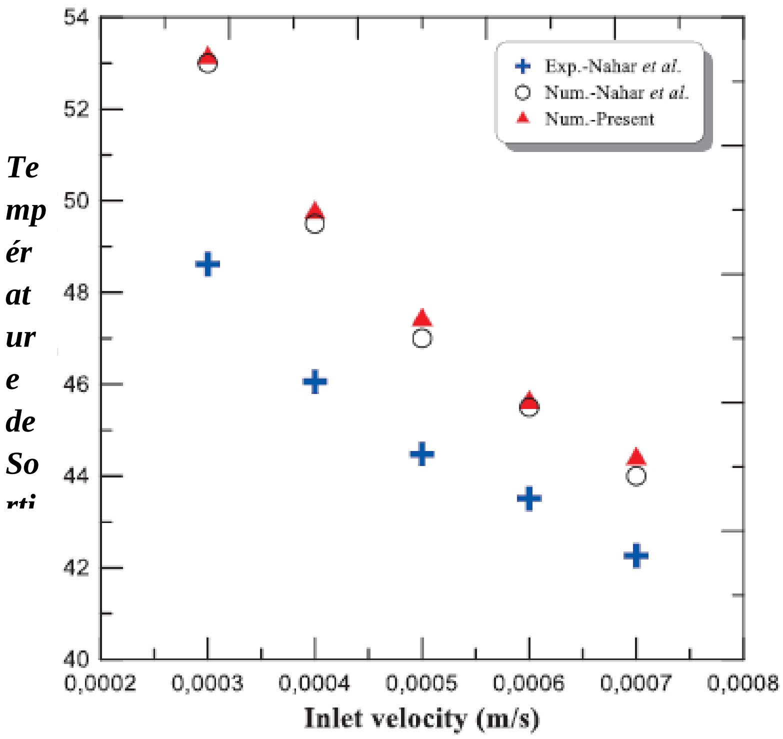


Figure 4- 4 : Effet de la vitesse d'entrée de l'eau sur sa température de sortie.

(G_T = 1000 W/m^2, T_{amb} = 34 °C, T_{in} = 34 °C). Les données d'après [44].

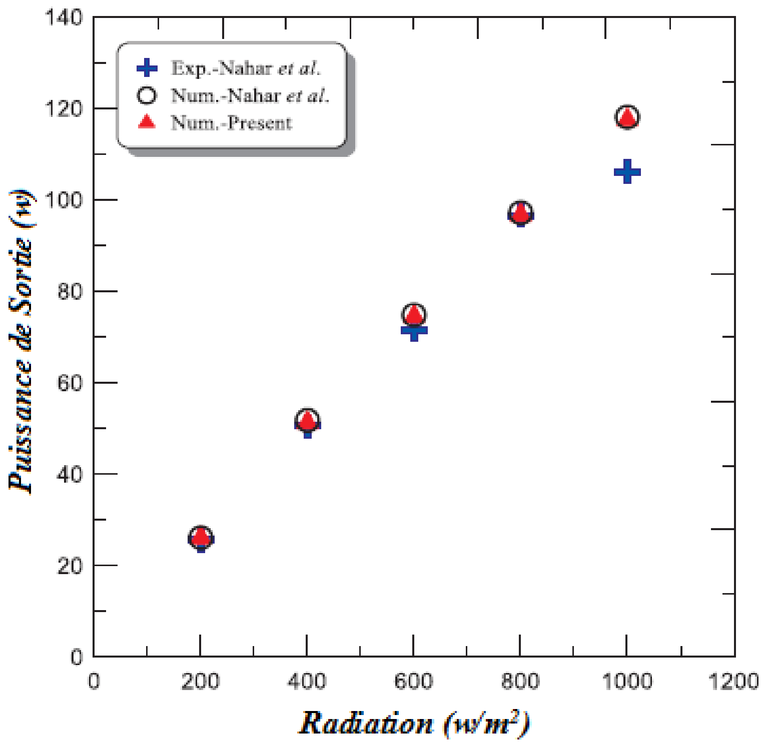


Figure 4- 5 **:**Effet de l'irradiation solaire sur la puissance électrique de sortie du PV (U_0 = 0,0007 m/s). Données après [44].

Dans les Figures. 4-4 et 4-5, les comparaisons entre nos résultats numériques avec les mesures expérimentales ainsi que les calculs numériques de [44]. Montrent de bons accords. En plus de ces deux cas d'études, les comparaisons de nos résultats numériques avec ceux de[44]. Pour d'autres paramètres du (PV/T); par exemple la température moyenne de la surface des cellules du PV, son efficacité thermique ainsi que l'efficacité électrique, donnent un excellent accord (moins de 1% dans tous les cas). Par conséquent, le code CFD ANSYS Fluent peut être utilisé en toute confiance dans les simulations du nouveau collecteur hybride (PV/T) proposé dans les travaux de la présente thèse.

4.3 Résultats et discussion

Il existe des paramètres intrinsèques et extrinsèques qui affectent l'efficacité globale du (PV/T). Ainsi, dans les travaux de la présente thèse, les deux influences sont prises en considération. Les paramètres intrinsèques sont la hauteur du canal de refroidissement et la vitesse d'entrée de l'eau; cependant, les paramètres extrinsèques sont la vitesse du vent, l'irradiation solaire, et la température ambiante. La température d'entrée d'eau est un autre paramètre intrinsèque utilisé dans les simulations comme entrée. Cette température est prise égale à la température ambiante. Par conséquent, la température d'entrée de l'eau de refroidissement varie à chaque fois que le la température ambiante varie. La hauteur du canal de refroidissement est prise comme une variable entre 1-cm et 5-cm; les vitesses d'entrée de l'eau varient quant à elles entre 0,0003 (m/s) et 0,0007 (m/s); le rayonnement solaire entre 200 (W/m^2) et 1000 (W/m^2) et enfin la vitesse du vent entre 0,6 (m/s) et 3 (m/s).

4.3.1. Effet de la température ambiante

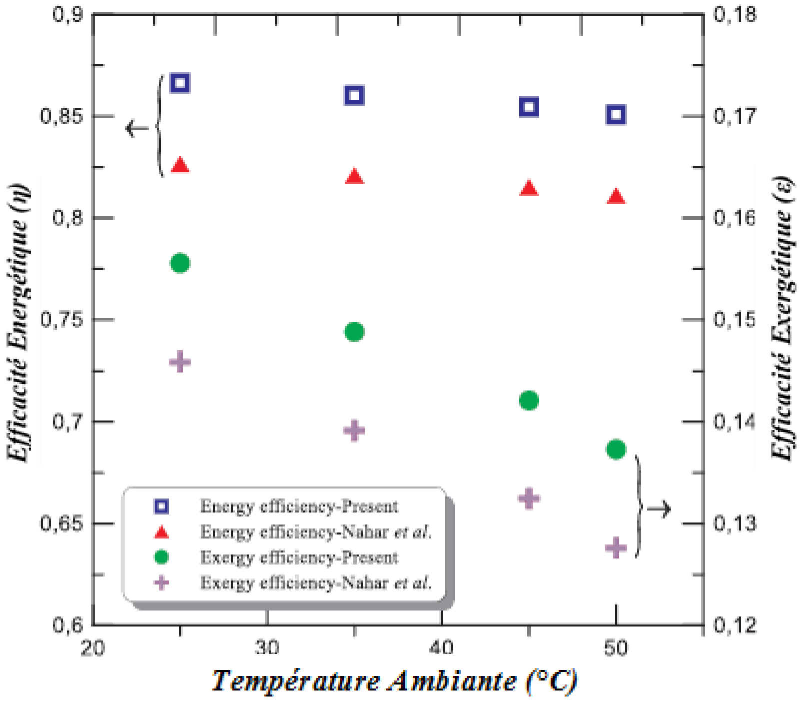


Figure 4- 6 :Variation des rendements globaux du (PV/T) avec la température ambiante.

Sur la figure 4-6, on peut remarquer que l'efficacité énergétique globale η_{pvt} du nouveau (PV/T) est supérieure à celle de Nahar *et al*. L'exergie globale ε_{pvt} est également plus élevée; cela montre qu'en termes de qualité, et ceci quelle que soit la température ambiante, le nouveau (PV/T) proposé dans cette étude est supérieur. De plus, il est intéressant de noter que pour les deux (PV/T), alors que ε_{pvt} diminue avec l'élévation de la température, η_{pvt}, cependant, reste presque invariable. La raison en est que le rendement thermique η_{th} qui constitue l'essentiel de l'efficacité globale (η_{pv} représente un maximum de 13 %) est invariable avec la température ambiante. De plus, comme prévu à partir de la deuxième loi de la thermodynamique, les maximums pour η_{pvt} et ε_{pvt} sont atteints lorsque la température ambiante est la plus basse. La raison pour laquelle ε_{pvt} diminue avec une augmentation de la température est due au fait que le collecteur hybride (PV/T perd une certaine partie de sa qualité qui est l'électricité.

Les figues. 4.-7 et 4.-8 ci-dessous appuient cette affirmation, et l'on peut remarquer que la température de la cellule augmente avec une augmentation de la température ambiante; ce qui génère un impact négatif sur l'efficacité électrique. La température moyenne de la cellule PV du nouveau (PV/T) est inférieure à celle de Nahar *et al*. de presque 13 °C. Ces simulations ont été réalisées avec les données d'entrée suivantes : vitesse du vent 0,6 (m/s), hauteur du canal 3-cm, rayonnement solaire G_T-1000 (W/m^2) et vitesse d'entrée d'eau 0,0007 (m/s).

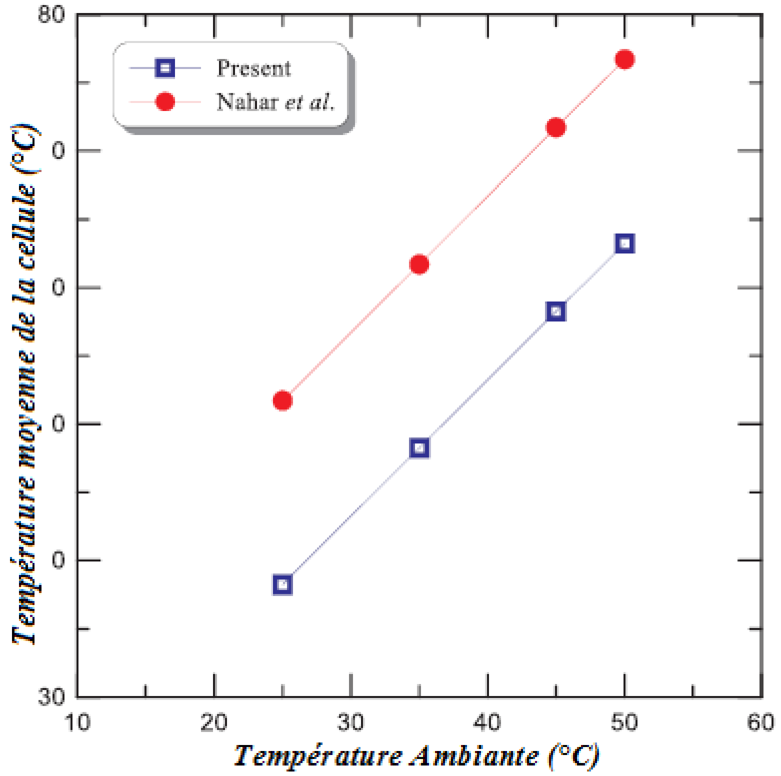


Figure 4- 7 : Variation de la température moyenne des cellules avec la température ambiante.

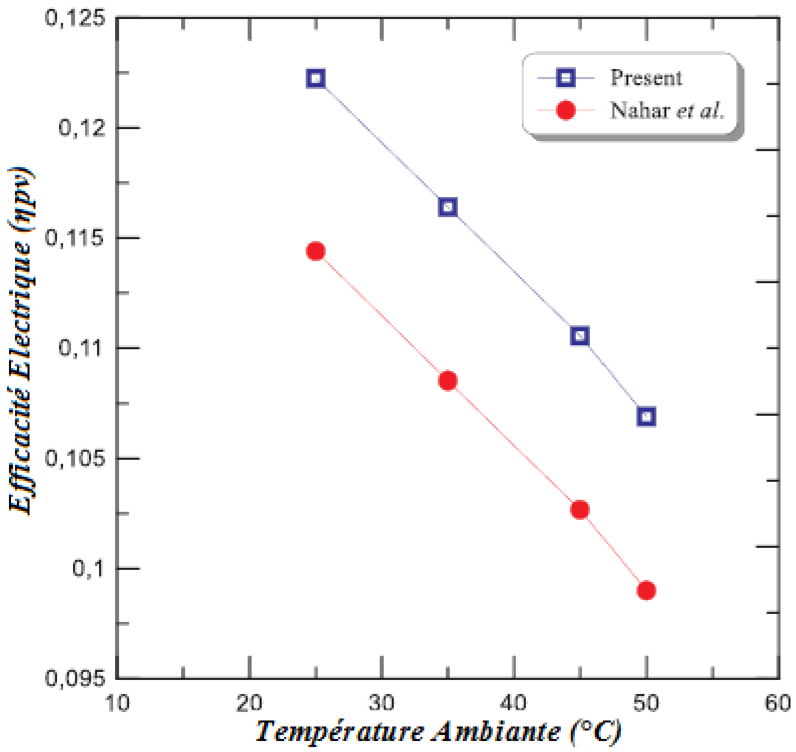


Figure 4- 8 : *Variation du rendement électrique η_{pv} avec la température ambiante.*

4.3.2. Effet de la hauteur du canal

L'influence de la hauteur du canal notée *H* sur les efficacités énergétiques et exergétiques globales du (PV/T) nous permettent de déterminer la section optimale sous la contrainte de garder un écoulement laminaire avec un nombre de Reynolds *Re* inférieur à 2300 (pour réduire les pertes de charges et donc la consommation électrique de la pompe). Dans les simulations, la hauteur du canal *H* varie entre 1-cm et 5-cm, cependant, la vitesse d'entrée de l'eau est maintenue égale à 0,0007 (m/s), le rayonnement solaire G_T à 1000 (W/m^2), la vitesse du vent 0,6 (m/s) et la température ambiante ainsi que la température d'entrée de l'eau à 34 °C, respectivement.

Dans la figure 4-9 ci-dessous, on remrquera que même si les efficacités énergétiques des deux (PV/T) sont presque égales, l'efficacité exergétique du nouveau (PV/T) est supérieure à celle de Nahar *et al*. De plus, on observe que si η_{pvt} augmente avec la hauteur du canal *H*, ε_{pvt} par contre diminue, provoquant une perte de la qualité de l'énergie pour les deux (PV/T). Dans une telle condition, l'optimisation du système (PV/T) devient une évidence, puisque les deux types d'efficités présentent des 'effets concurrents'. Par conséquent, il est nécessaire de présenter les variations des deux efficacités (c'est-à-dire η_{pvt} et ε_{pvt}) dans une même figure; l'optimum géométrique sera le point d'intersection des deux courbes.
Cependant, étant donné qu'en valeurs absolues les rendements sont différents, les deux courbes en fonction de *H* représentant respectivement (η) et (ε), n'ont pas de point d'intersection correspondant à la hauteur optimale du canal de refroidissement.

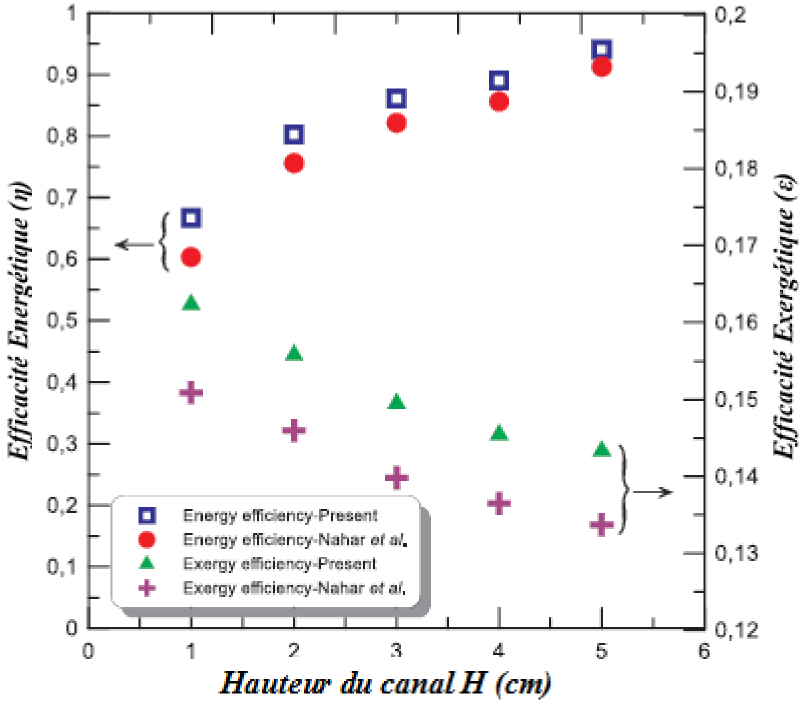


Figure 4- 9 :*Variation des rendements globaux du (PV/T) avec la hauteur de canal* H.

D'autre part, comme montré dans la figure 4-10, il est possible de représenter leur différence, soit ($\eta - \varepsilon$) en fonction de *H*, et obtenir ainsi une équation de la courbe passant par tous les

points (coefficient de corrélation R^2= 1) sous la forme d'un polynôme d'ordre 3 donné ci-dessous:

$$\eta(\%) - \varepsilon(\%) = 0.0081 \cdot H^3 - 0.088 \cdot H^2 + 0.3502 \cdot H + 0.2342 \qquad \textbf{Eq. 4.1}$$

L'équation 4-1 présente un point d'inflexion qui peut être déterminé à partir de la racine de la dérivée seconde de l'équation 4-1, et qui donnera la valeur exacte de la hauteur optimale du canal de refroidissement égale à $H_{op}t$ = 3,61 cm.

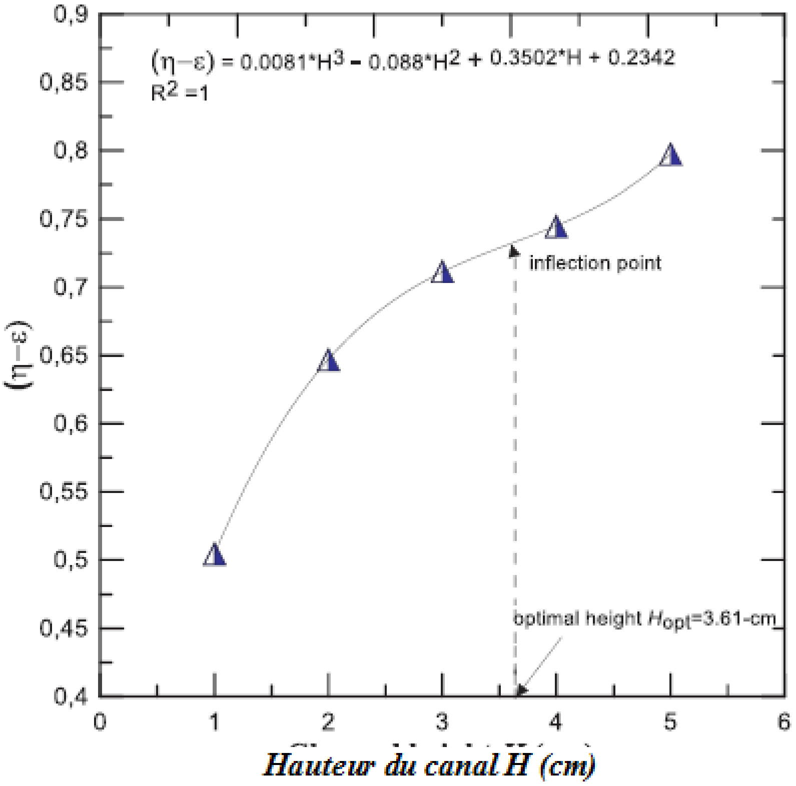


***Figure 4- 10 :** Variation du paramètre (η − ε) avec la hauteur du canal* H.

Comme mentionné précédemment, un (PV/T) similaire à celui proposé dans cette étude a été fabriqué par W.A.M. Al Shohani*et al*. Dans leurs travaux expérimentaux, les auteurs mesurent la température maximale atteinte par la cellule, le pourcentage de réduction de la température de la cellule ainsi que la valeur de la réduction de la température de la cellule, respectivement. Selon leurs résultats montrés dans la Fig. 4-11 ci-dessous, la hauteur optimale du canal est située entre 3-cm et 4-cm; cela confirme encore une fois que le méthode proposée pour déterminer la hauteur optimale du canal de refroidissement est précise.

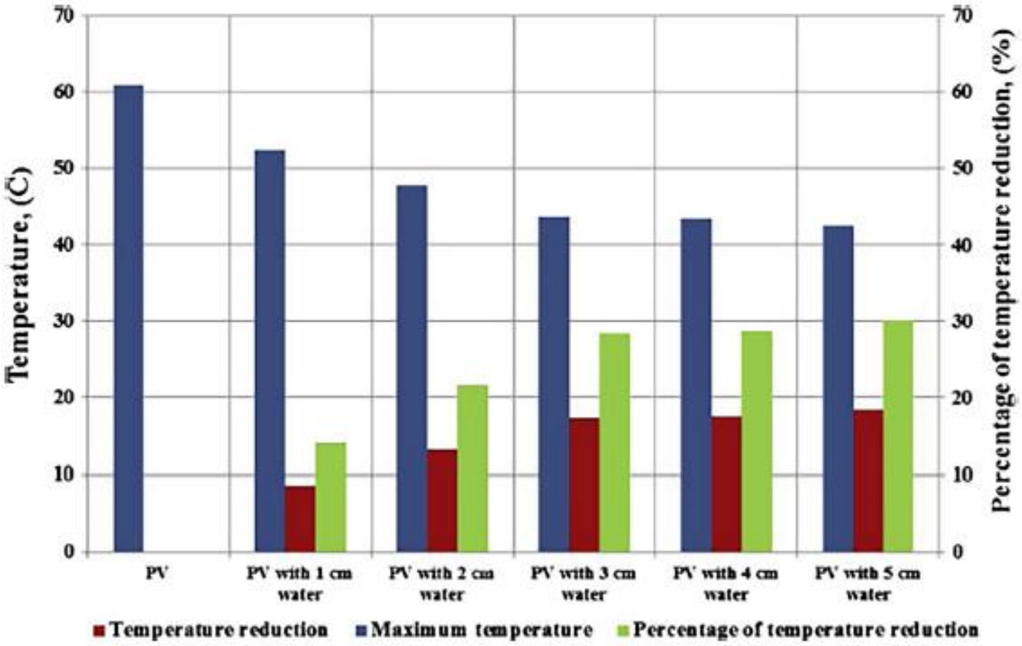


Figure 4- 11 :Résultats des mesures expérimentales de la température maximale de la cellule, de la réduction de la température et du pourcentage de réduction de la température après 60 min pour le PV avec différentes épaisseurs d'eau par W.A.M. Al Shohani et al. (Reproduit avec la permission d'Elsevier).

Pour comprendre pourquoi l'efficacité énergétique globale du (PV/T) η_{pvt} augmente tandis que l'efficacité exergétique ε_{pvt} diminue lorsque la hauteur H du canal augmente, il faudra examiner de plus près les Eqs. 2.1, 2.2, 3.7, et 2.22, respectivement. Lorsque la hauteur du canal augmente, la température de sortie d'eau T_{out} diminue, cela provoque une diminution de la valeur de $(T_{out} - T_{in})$. La section transversale du canal S_{ch}, cependant, augmente de manière significative lorsque H augmente, de sorte que le produit S_{ch} par $(T_{out} - T_{in})$, soit l'énergie thermique collectée donnée par l'équation 2.1 $\dot{E}_{th}$ augmente avec H. Ceci explique pourquoi le rendement thermique η_{th} donné par l'équation 3.7 augmente avec H. Si l'on considère aussi que l'efficacité du PV η_{pv} augmente, par conséquent l'efficacité énergétique globale du (PV/T) η_{pvt} augmente aussi. D'autre part, le rendement exergétique thermique ε_{th} diminue avec H.

Sur la figure 4.-12 ci-dessous, on peut percevoir que le le produit $\eta_{th}\cdot(1 - T_{amb}/T_{out})$ diminue lorsque H augmente, de sorte que selon l'équation 3.22, ε_{th} diminuera également. L'efficacité exergétique ε_{pv} du PV, augmente légèrement, donc, l'efficacité exergétique globale du (PV/T) ε_{pvt} dépend fortement du rendement exergétique thermique ε_{th} et suit son évolution avec H. Pour le présent cas d'étude, le lissage est donné par l'équation suivante :

$$\eta_{th}\cdot(1-T_{amb}/T_{out}) = 0{,}001\cdot H^2 - 0{,}0113\cdot H + 0{,}0493 \text{ (avec } R^2 = 0{,}9999) \qquad \textbf{Eq. 4.2}$$

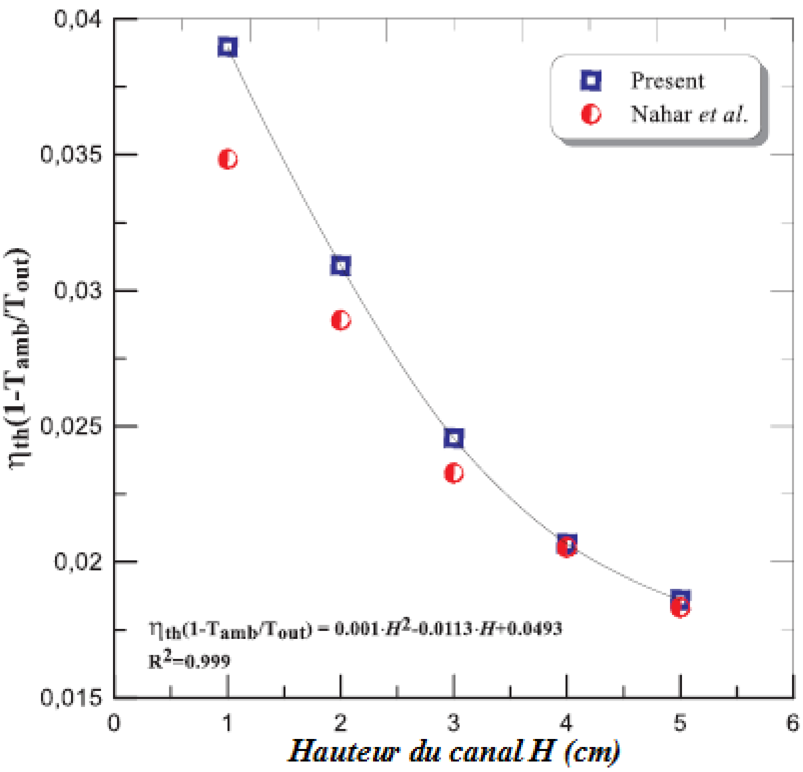


Figure 4- 12 :Variation du paramètre $\eta_{th}\cdot(1 - T_{amb}/T_{out})$ avec la hauteur du canal H.

La température moyenne de la cellule photovoltaïque du nouveau (PV/T) est inférieure à celle de Nahar *et al*. Sur la figure 4.13, on peut observer qu'au-dessus d'une hauteur du canal de refroidissement *H* d'à peu près 3,7-cm, la température de la cellule PV du nouveau collecteur hybride (PV/T) diminue très légèrement; cette signifie que l'absorption d'énergie thermique (ou du rayonnement infrarouge thermique avec des longueurs d'onde supérieures à 750 nm) par l'eau est presque totale.

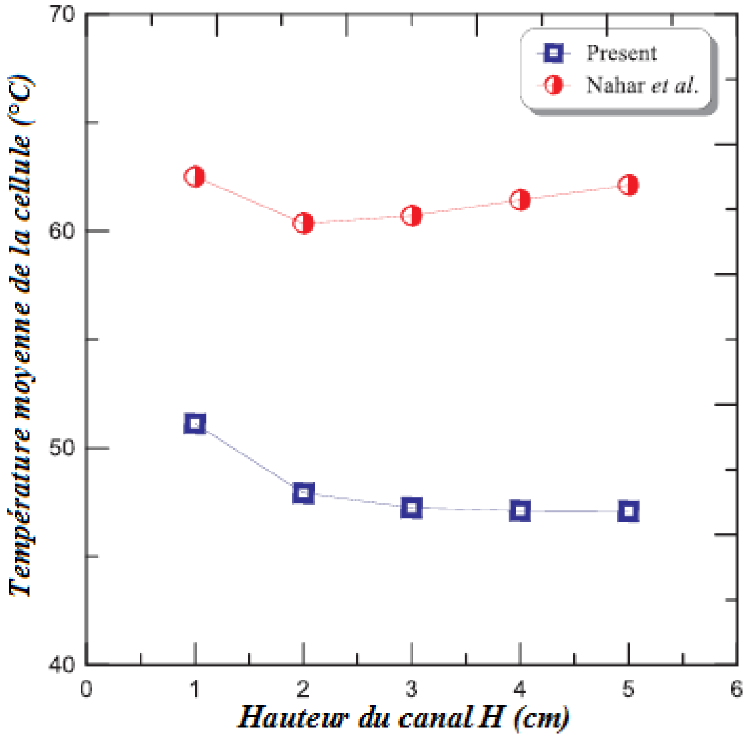


Figure 4- 13 :Variation de la température moyenne des cellules PV avec la hauteur du canal H.

Dans la figure 4.14, le rayonnement solaire ATM 1.5, le rayonnement solaire à des profondeurs au-dessous du niveau d'eau de 2, 3, 4 et 5 cm, respectivement, ainsi que la réponse spectrale d'une cellule solaire en silicium monocristallin, sont présentés. On constate que la cellule solaire absorbe le rayonnement IR (longueurs d'onde supérieures à 750 nm), ce dernier est donc transformé en chaleur au lieu d'électricité. Cet effet indésirable est souligné dans l'équation 2.21, où la seconde intégrale du membre de droite de l'équation c'est-à-dire $\int_{\lambda=750\,nm}^{\infty} G(\lambda, 0)e^{-W_{Abs}(\lambda)H}d\lambda$ doit être réduite à un minimum. L'eau est utilisée pour absorber une certaine quantité de ce rayonnement, à une profondeur de 2-cm (en rouge), le rayonnement solaire est plus faible par rapport à l'ATM 1.5, il est encore réduit à 3-cm (vert), puis, à 4-cm (noir) et 5-cm (violet), le rayonnement solaire IR devient presque négligeable. Cependant, comme le souligne Rosa-Clot *et al.*, une hauteur de 3-cm (ou 3,6-cm dans le cas présent) semble être un bon compromis entre trois exigences : un poids limité, une grande absorption du rayonnement infrarouge, un écoulement d'eau facile afin d'extraire la chaleur produite.

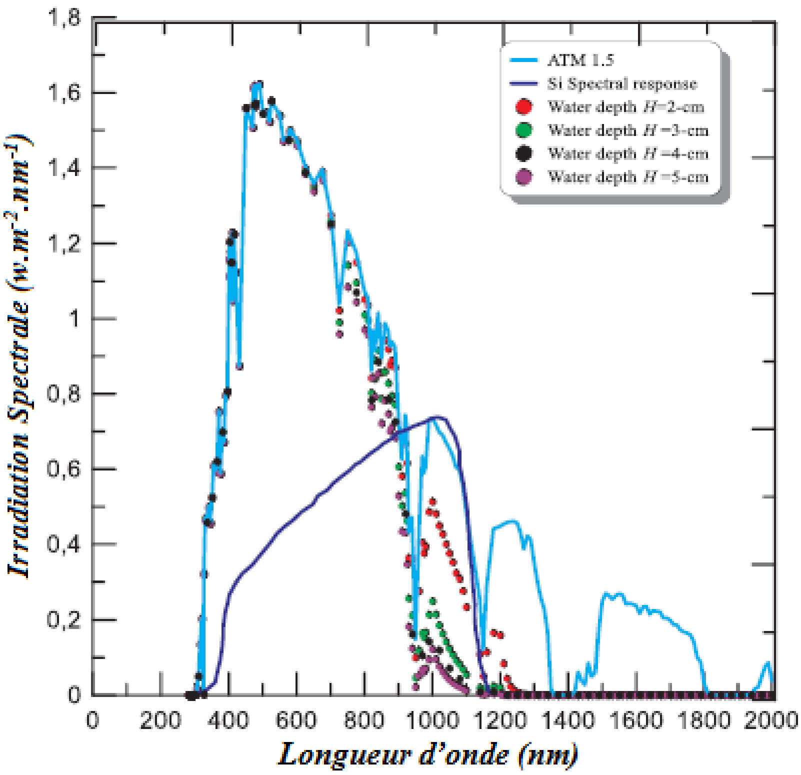


Figure 4- 14 :Variation des radiations solaires à différentes profondeurs d'eau et réponses spectrales d'une seule cellule solaire Si avec la longueur d'onde.

4.3.3. Effet de la vitesse d'entrée de l'eau

Dans les simulations, la vitesse d'entrée de l'eau varie entre 0,0003 et 0,0007 (m/s), cependant, la hauteur du canal est maintenue égale à 3 (cm), l'irradiation solaire GT à 1000 (W/m^2), la vitesse du vent à 0,6 (m/s) et la température ambiante ainsi que la température d'entrée d'eau à 34 °C, respectivement. Comme pour l'étude de l'influence de la hauteur du canal H, dans ce cas aussi, on peut remarquer sur la Fig. 4.15 que, même si les efficacités énergétiques η_{pvt} sont presque égales, l'efficacité exergétique ε_{pvt} du nouveau (PV/T) est supérieur à celle de Nahar et al. De plus, η_{pvt} augmente avec l'augmentation de U_0 (vitesse d'entrée de l'eau), en revanche, ε_{pvt} diminue.

Les mêmes équations (c'est-à-dire les équations 3.1, 3.2, 3.7, et 3.22) sont utilisées pour comprendre les tendances de η_{pvt} et ε_{pvt} avec la vitesse d'entrée U0. Dans le cas présent, la section efficace Sch est constante, tandis que U_0 est une variable, donc, au lieu du paramètre Sch·(Tout − Tin) utilisé dans la sous-section 4.3.2 pour expliquer les tendances de η_{pvt} et ε_{pvt}, dans le cas présent, il est remplacé par U_0·(Tout − Tin), en gardant exactement les mêmes explications des comportements de η_{pvt} et ε_{pvt} avec la vitesse d'entrée U_0.

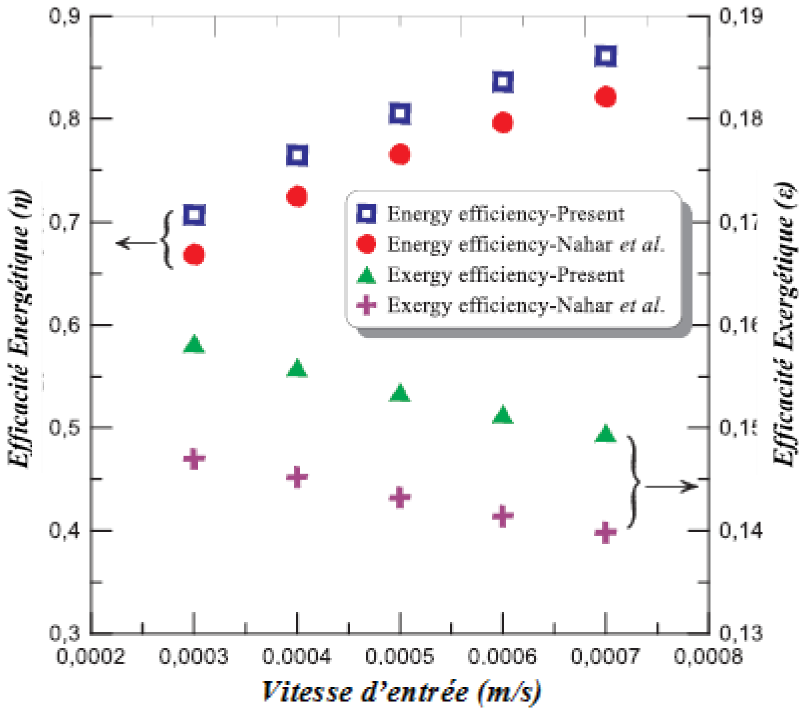
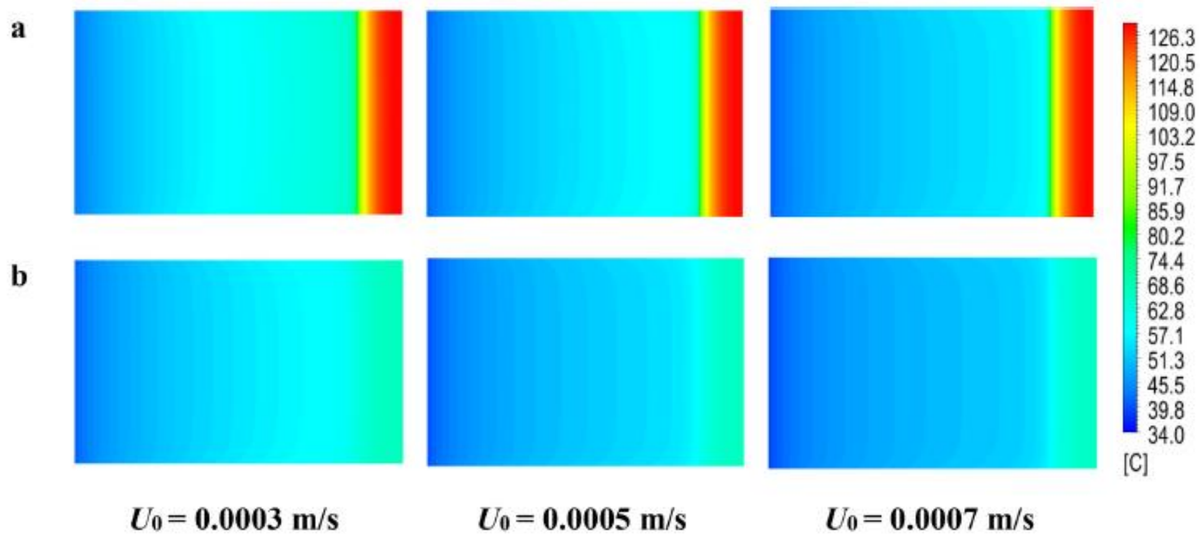


Figure 4- 15 :Variation des rendements globaux du (PV/T) avec la vitesse d'entrée de l'eau.

Dans la Fig. 4.16 ci-dessous, l'avantage de la nouvelle configuration (PV/T) par rapport à celle de [44]en ce qui concerne le refroidissement du la cellule photovoltaïque est nettement perceptible. En fait, contrairement à la température moyenne, la distribution de la température locale de la cellule montre les emplacements où existe un risque de surchauffe excessive, conduisant à non seulement la détérioration de l'efficacité de la cellule, mais plus grave encore, des fissures et arrêt de fonctionnement.

Dans la figure 4.16-(a), pour le cas du (PV/T) de Nahar et al., l'augmentation de la vitesse d'entrée de l'eau U_0 de 0,0003 à 0,0007 (m/s) ne réduit pas la surchauffe existant dans la région où le fluide quitte le (PV/T). En effet, l'eau à son entrée refroidit les cellules PV, cependant, elle commence à saturer de sorte qu'à l'extrémité vers la sortie, elle ne remplit plus son rôle de refroidisseur. Inversement, pour le nouveau (PV/T), le problème de la surchauffe n'existe pas; comme le montre la figure 4.16-(b). En effet, quel que soit l'emplacement, la température est toujour inférieure à 68 °C, alors qu'elle atteint les 126 °C pour le (PV/T) de Nahar *et al*.



(a) (PV/T) de Nahar *et al*. **(b)** (PV/T) proposé dans cette étude.

Figure 4- 16 :Distribution de la température dans la cellule PV pour différentes vitesses d'entrées de l'eau.

4.3.4. Effet de l'irradiation solaire

Pour étudier l'effet du rayonnement solaire, une vitesse d'entrée U_0 = 0,0007 (m/s), une vitesse du vent de 0,6 (m/s), une hauteur du canal H = 3-cm, une température ambiante et d'entrée d'eau toutes deux égales à 34 °C sont respectivement considérées. Comme le montre la figure 5.17, les efficacités globales selon la première loi des deux systèmes (PV/T) η_{pvt} sont presque égales et ne varient pas lorsque le rayonnement solaire augmente. D'autre part, l'efficacité selon la seconde loi ε_{pv}t augmente linéairement avec le rayonnement solaire, et les calculs donnent une valeur plus élevée pour le nouveau (PV/T) par rapport à celle de Nahar *et al*. Pour un ensoleillement modéré de 200 (W/m^2), ε_{pvt} des deux systèmes (PV/T) sont presque égaux, car lorsque l'irradiation augmente, la différence entre eux commence à augmenter.

C'est parce que comme le montre la figure 4.18, l'efficacité électrique ou du processus photovoltaïque diminue lorsque le rayonnement solaire augmente, et selon l'équation 2.21, l'exergie électrique ε_{pv} va donc diminuer. D'un autre côté, selon l'équation 2.22, l'exergie thermique ε_{th} augmente avec le rayonnement solaire en raison de l'augmentation de la température de l'eau à sa sortie. Les présentes conclusions de l'étude sont conformes à celles de [25]qui ont trouvé que l'irradiation solaire est un facteur favorable pour ε_{th} mais défavorable pour ε_{pv}.

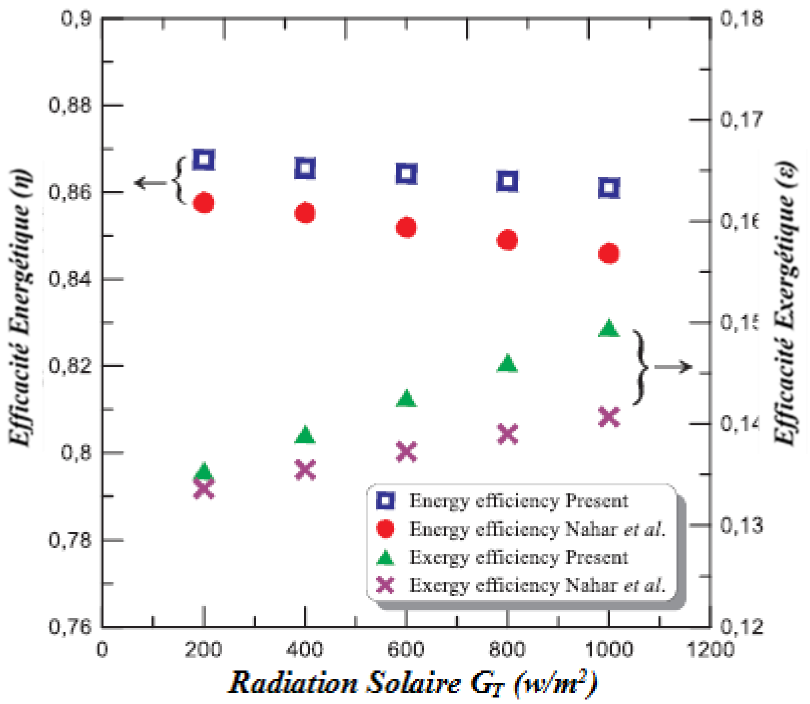


Figure 4- 17 :Variation des rendements globaux avec le rayonnement solaire.

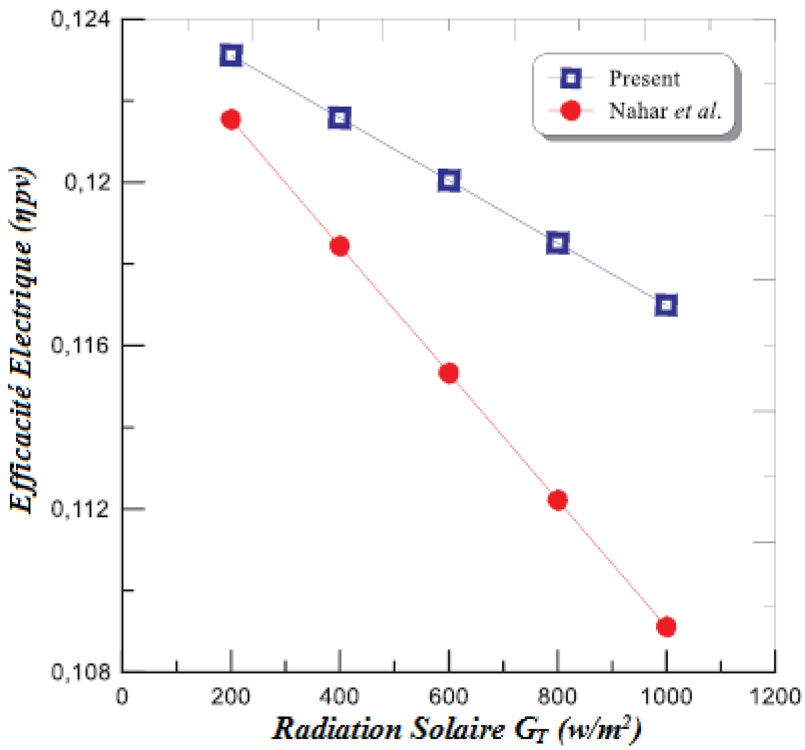


Figure 4- 18 :*Variation du rendement électrique η_{pv} avec le rayonnement solaire.*

4.3.5. Effet de la vitesse du vent

Les simulations ont été faites pour un ensoleillement de 1000 (W/m^2), une vitesse d'entrée d'eau de 0,0007 (m/s), une hauteur *H* de 3 cm et une température ambiante égale à celle

d'entrée d'eau de 34 °C. La vitesse du vent est prise comme variant entre 0,6 et 3 (m/s). On peut remarquer sur la figure 5.19 que les efficacités énergétiques et exergétiques du nouveau (PV/T) sont supérieures à celles de Nahar *et al.*, et que pour les deux (PV/T), η_{pvt} diminue tandis que ε_{pvt} reste presque constante lorsque la vitesse du vent augmente. De plus, si pour le (PV/T) de Nahar *et al.* de même que pour Chow *et al.*, il s'avère que le vent impacte négativement l'efficacité énergétique η_{pvt} (y compris ε_{pvt} pour Chow), pour ce nouveau (PV/T) ,cependant, il y a une diminution de l'efficacité, mais elle reste relativement faible. Cette observation renforce encore plus le fait que la nouvelle configuration du (PV/T) à base d'eau lui confère de nombreux avantages par rapport aux différents (PV/T) à base d'eau proposaient auparavant, en conservant ses performances intactes quelle que soit la vitesse du vent.

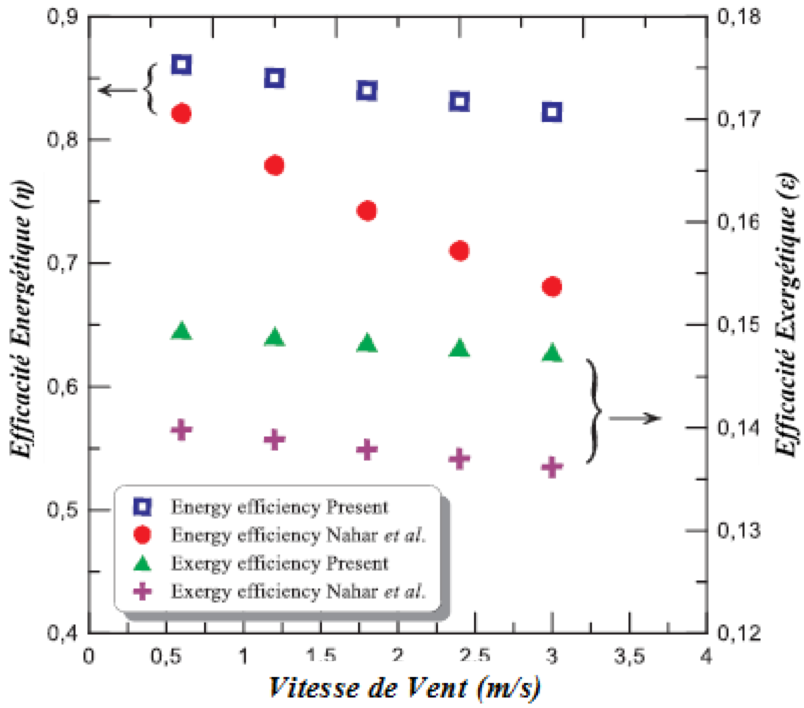


Figure 4- 19 :Variations des efficacités globales avec la vitesse du vent.

Conclusion :

Dans ce chapitre, après validation du modèle numérique, la comparaison des résultats des simulations de la nouvelle conception du collecteur solaire hybride PVT avec canal placé au-dessus du PV avec celui de Nahar *et al.*, dont le canal est placé au-dessous du PV, montre clairement que ce soit du point de vue quantitatif ou bien qualitatif, le PVT proposé dans ce travail de doctorat est supérieur. L'autre fait important concerne la distribution des températures des cellules PV. De plus, la Fig. 4.16 montre pour le PVT de Nahar *et al.*, que la distribution de la température locale de la cellule fait apparaitre des emplacements où existe un risque de surchauffe excessive, conduisant à non seulement la détérioration de l'efficacité de la cellule, mais plus grave encore, des fissures et un arrêt définitif de fonctionnement. Cet effet indésirable n'existe pas dans la nouvelle configuration du PV/T à base d'eau avec canal placé au-dessus du PV.

CHAPITRE V

LE CAPTEUR HYBRIDE (PV/T) À BASE DE NANOFLUIDE EAU-TiO_2

Préambule :

L'efficacité des capteurs hybrides PVT est limitée par les propriétés thermophysiques du fluide de refroidissement, qui sont en général assez moyens pour les fluides typiques utilisés dans les capteurs solaires. Cependant, il a été montré que le mélange de nanoparticules dans un liquide dit de base permet d'améliorer ces propriétés thermophysiques comme la conductivité thermique. Dans ce chapitre V, une étude bibliographique très détaillée sur différents nanofluides comprenant entre autres : leurs méthodes de fabrication, les problèmes d'agglomération, les méthodes de mesures et les modèles d'estimation des propriétés thermophysiques (conductivité thermique, viscosité dynamique et chaleur spécifique) sont présentées. En ce qui concerne l'étude d'un collecteur hybride PVT à base de nanofluide, nous avons choisi comme cas d'étude le nanofluide eau−TiO_2. Cette étude est importante car elle permettra de vérifier par simulation si oui ou non il existe une nette différence en terme de performance entre deux types de PVT; à base d'eau et nanofluide eau−TiO_2, respectivement.

5.1. Etat de l'art sur les capteurs hybrides à base de nanofluides :

Un nanofluide peut être défini comme le fluide contenant des particules nanométriques (1 à 100 nm). Ces fluides sont constitués de nanoparticules mélangées dans le fluide de base figure 5-2. Les nanoparticules utilisées dans les nanofluides sont généralement constituées de métaux, d'oxydes, de carbures ou de nanotubes de carbone. Les fluides de base courants sont constitués d'eau, d'éthylène glycol et d'huile. Les nanofluides ont des propriétés spéciales qui les rendent utiles dans plusieurs applications dans des phénomènes impliquant un transfert de chaleur par exemple. L'électronique, les piles à combustible, le domaine médical, les moteurs hybrides, la gestion thermique des moteurs, les appareils électroménagers, dans le meulage, l'usinage, etc. Ils présentent des propriétés thermiques et physiques accrues par rapport aux fluides conventionnels.

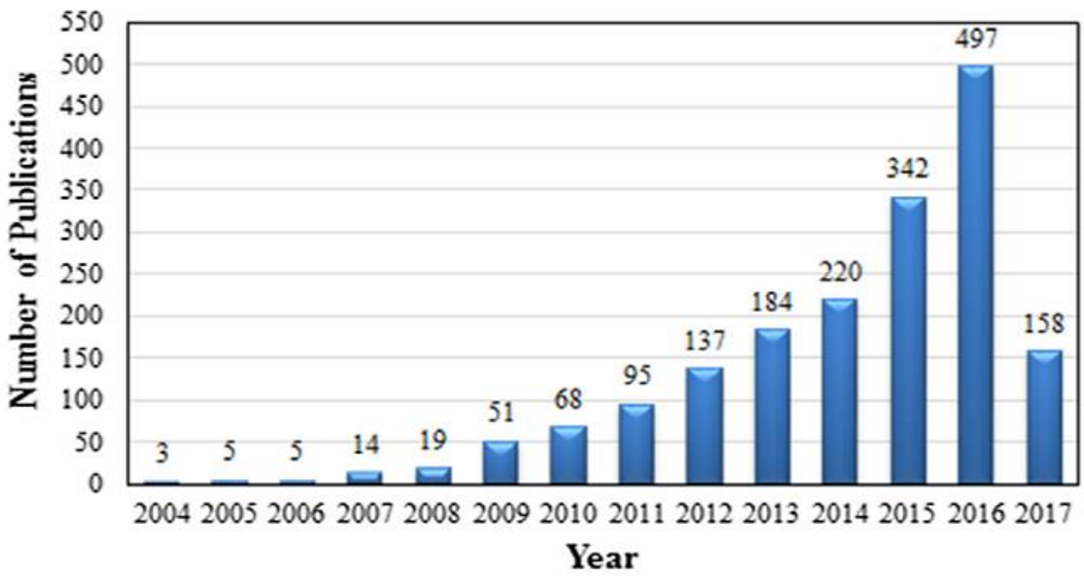


Figure 5- 1 :Nombre de publications impliquant des nanofluides de TiO_2 dans la littérature selon leurs de publications.[52]

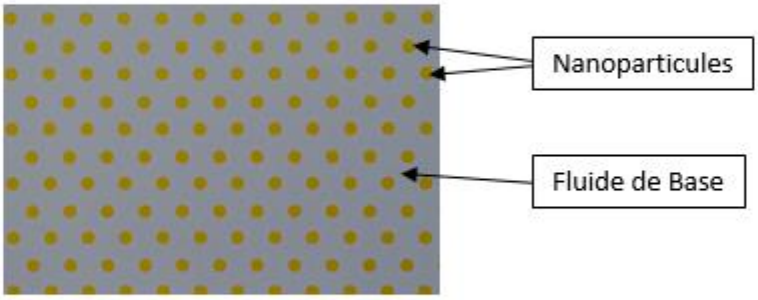


Figure 5- 2 :Présentation d'un exemple d'un nanofluide.

Une approche alternative simule la prise en compte du nanofluide comme un modèle à deux composants. La nanoscience joue un rôle important dans la promotion de la technologie. Le nanofluide consiste en un mélange d'une substance liquide (fluide de base) et d'un matériau de taille nanométrique (nanoparticule). Les nanofluides ont des propriétés thermiques et physiques intensifiées comme la diffusivité thermique, le phénomène physique thermique et les coefficients de transfert de chaleur par convection par rapport aux fluides standard. Un remplacement et une facilité grâce à l'amélioration des performances des collecteurs en étoile consistent à utiliser un nanofluide in situ d'un fluide caloporteur typique. Actuellement, des variétés complètement différentes de nanoparticules sont utilisées dans les nano fluides tels que :

- Céramiques oxydées (Al_2O_3, CuO),
- Carbures métalliques (Sic),
- Nitrures (An, Sin),
- Métaux (Al, Cu, Ti),
- Non-métaux (graphite, annotations de carbone),
- En couches (Al + Al_2O_3, Cu + C),

Les matériaux pour le fluide de base comprennent :

- L'eau,
- Éthylène glycol et autres liquides de refroidissement,
- Huile et autres lubrifiants,
- Les bio-fluides,
- Solutions polymères,
- Autres fluides courants

5.1.1. Préparation du nanofluide :

Dans les études expérimentales, la préparation de nanofluides est la prochaine étape la plus essentielle. Les nanofluides ne sont pas simplement formés par mélange de particules solides dans des liquides de base. Certaines exigences particulières sont nécessaires, notamment une suspension uniforme, stable et durable, une accumulation minimale de particules, aucune

altération chimique du fluide, etc. Il existe principalement deux techniques utilisées pour produire des nanofluides : les méthodes en une seule étape et en deux étapes.

a. Méthode en deux étapes :

La méthodologie en deux étapes est la méthodologie la plus couramment utilisée pour préparer les nanofluides. Les nanoparticules utilisées sont initialement fabriquées sous forme de poudres sèches par des moyens chimiques ou physiques. Ensuite, la poudre de taille nanométrique va être mélangée dans un fluide sous agitation, en s'homogénéisant pour obtenir le nanofluide final figure 5-2. La méthodologie à deux étapes est la méthodologie la plus économique pour fournir des nanofluides à grande échelle. En raison de leur étendue et de leur activité de surface élevée, les nanoparticules ont tendance à se combiner. La technique nécessaire pour renforcer la stabilité des nanoparticules dans les fluides consiste à utiliser des tensio-actifs. Cependant, l'aspect pratique des tensio-actifs à des températures élevées est en outre un problème énorme, en particulier pour les applications à haute température. En raison du problème de préparation de nanofluides stables par une méthodologie en deux étapes, de nombreuses unités de zone de techniques avancées ont été développées pour fournir des nanofluides, ainsi qu'une méthodologie en une étape.

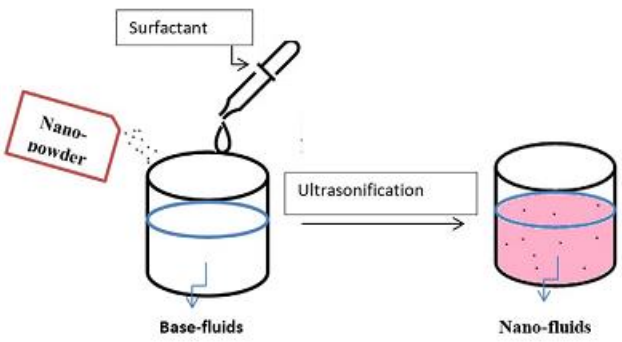


Figure 5- 3 :Schéma du processus de préparation de nanofluides en deux étapes.

Méthode en une étape :

Pour réduire l'agglomération des nanoparticules,[53] Développé une vapeur physique. Méthodologie de condensation en une étape pour organiser les nanofluides Cu / éthylène glycol. La méthode en une étape consiste à créer et à disperser en même temps les particules dans le fluide. Au cours de cette méthodologie, les processus de séchage, de stockage et de dispersion de l'unité de surface de nanoparticules évités, donc le collage des nanoparticules est réduit, et donc la stabilité des fluides est augmentée. Les processus en une seule étape préparent des nanoparticules uniformément réparties et, par conséquent, les particules sont souvent suspendues de manière stable dans le fluide de base figure 5-4.

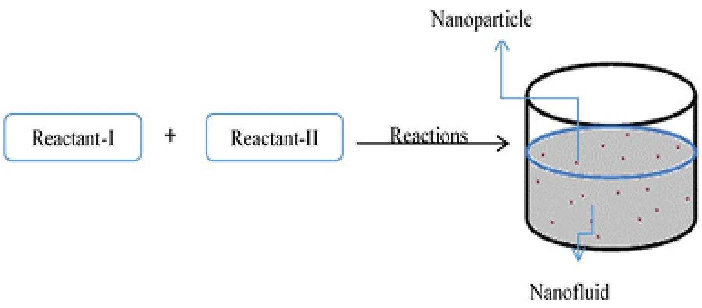


Figure 5- 4:Schéma du processus de préparation de nanofluides en une étape.

Raisons de choisir le nanofluide :

1. Conductivité thermique : L'élévation anormale de la conductivité thermique est observée lors de l'utilisation de nanofluides.
2. Diffusivité thermique : La diffusivité thermique augmente lors de l'utilisation de nanofluides, augmentant ainsi le taux de transfert de chaleur.
3. Viscosité : L'augmentation de la viscosité due à l'ajout de nanoparticules conduit à des propriétés thermiques améliorées.
4. Coefficient de transfert de chaleur par convection : Le coefficient de transfert de chaleur par convection augmente lors de l'utilisation de nanofluide.
5. absorption optique : grâce à l'ajout de nanoparticules métalliques, les propriétés d'absorption optique sont améliorées.
6. Aspect environnemental : l'utilisation de nanofluides dans les capteurs solaires réduit les émissions de CO2 et économise de l'électricité et des carburants annuels.
7. Rapport surface / volume : Les nanoparticules ont généralement un grand rapport surface / volume qui augmente le transfert de chaleur entre le fluide de base et la particule solide.
8. Coût global et réduction de la taille du capteur solaire lors de l'utilisation de nanofluides.
9. Coefficient d'absorption élevé : Ceci est obtenu lors de l'utilisation de nanofluide à la place d'un fluide conventionnel tel que l'eau
10. Réduction des pertes : Lors de l'utilisation du nanofluide, les pertes radiatives et convectives diminuent en raison de l'augmentation du transfert de chaleur entre la plaque absorbante et le nanofluide.
11. Image des nanoparticules de TiO_2 (MET, MEB et autres) :

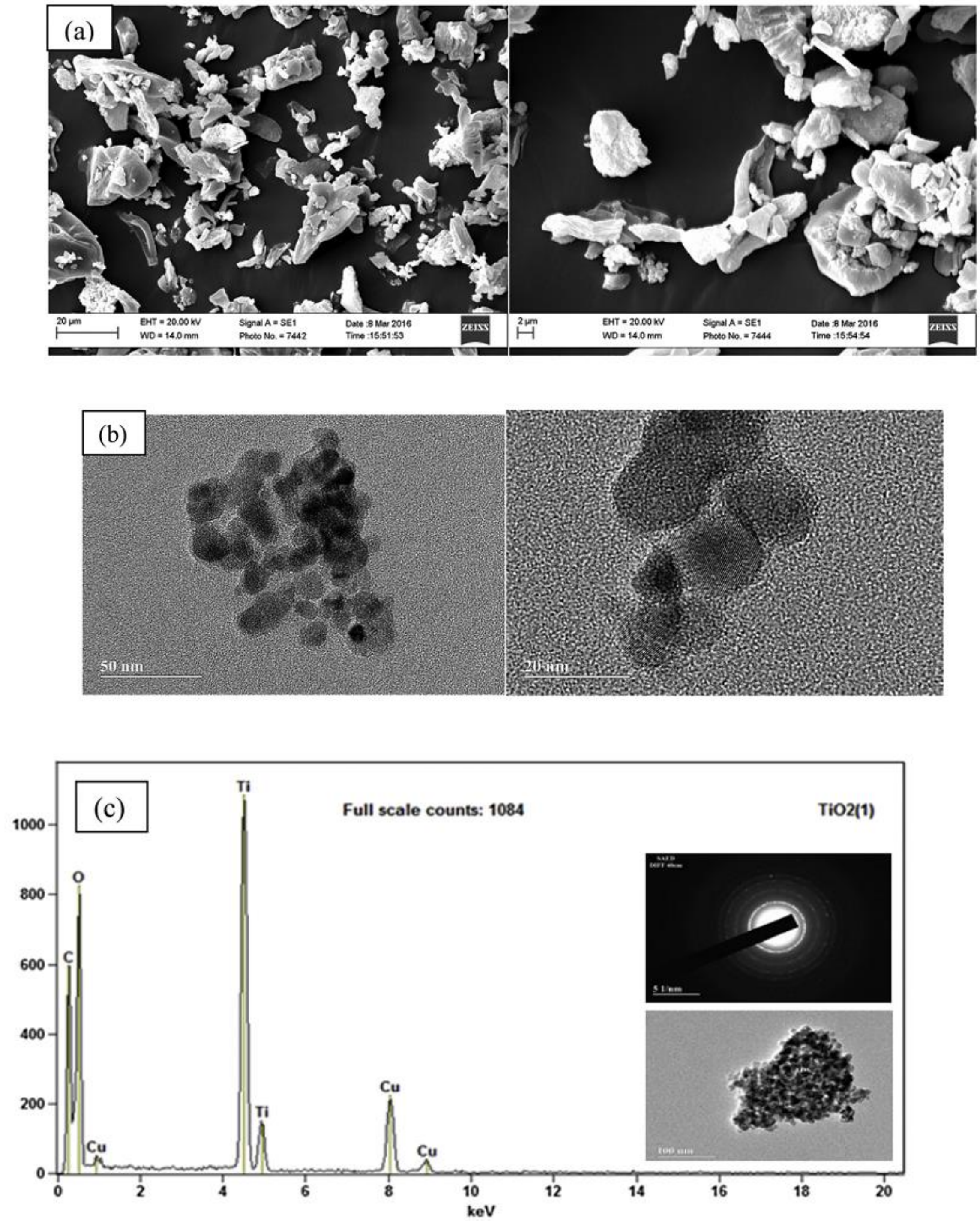


Figure 5- 5:(a) Images MEB de poudre de nanoparticules de TiO_2 d'une taille moyenne de 11 nm, (b) images TEM de nanoparticules de TiO_2-PVA dispersées dans l'eau et (c) image spectrale EDX de nanoparticules de TiO_2-PVA.[52]

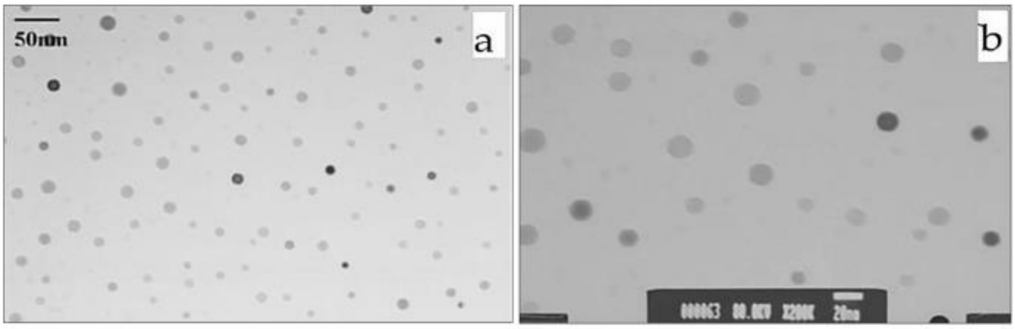


Figure 5- 6:*(a)* Image FE-MEB de nanoparticules de TiO_2*; (b)* Image MET du nanofluide TiO_2*[54]*.

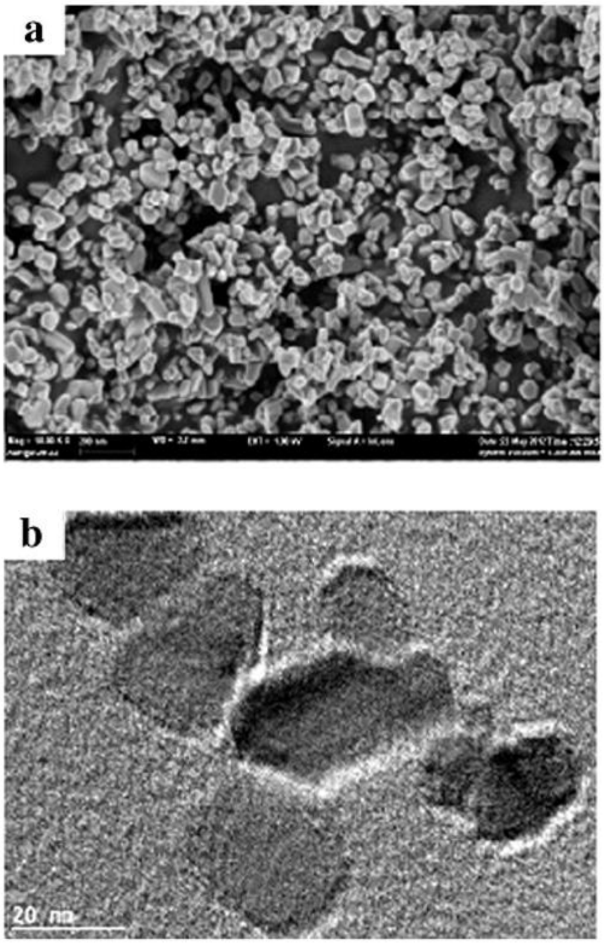
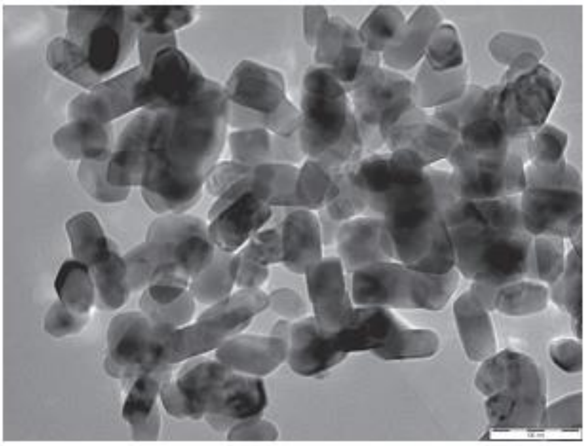


Figure 5- 7:*(a)* Image SEM de nanoparticules de TiO_2, (b) image TEM de nanoparticules de TiO_2.*[55]*



(a) TiO_2 nanofluids (X 140,000)

Figure 5- 8:Images MET pour nanofluide TiO_2.*[56]*.

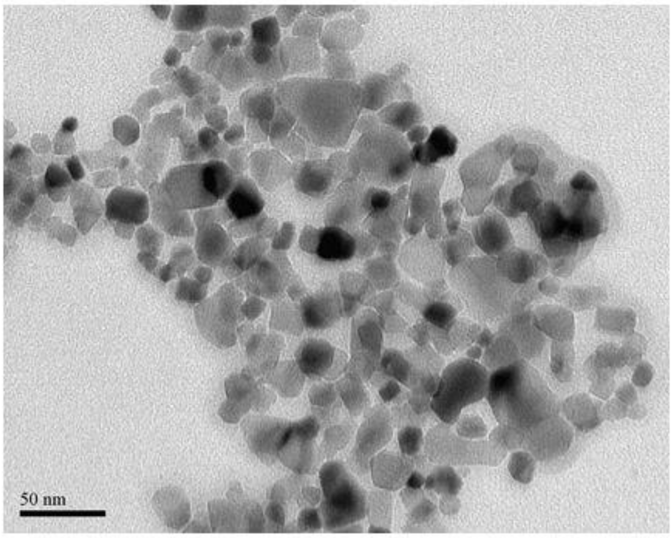


Figure 5- 9:Image TEM de nanoparticules de TiO_2 dispersées dans l'eau.*[57]*.

5.1.2. Etude expérimentale du module PV avec nanofluide :

[58] ont examiné expérimentalement l'augmentation HT dans un module PV utilisant un nanofluide Boehmite-eau avec trois concentrations (0,01%, 0,1% et 0,5% en poids) ainsi que deux configurations de canaux différentes, hélicoïdales et droites à l'arrière du module PV.

L'existence de nanoparticules produit un effet significatif sur la réduction de la température moyenne de la cellule PV ($T_{Surface}$) par rapport à la température du BF (eau). Il a été noté que la baisse de la $T_{Surface}$ dépend de la fraction de nanoparticules. La chute maximale de la $T_{Surface}$ par rapport à la température de référence (24,22°C et 18,33°C pour les canaux hélicoïdaux et droits, respectivement) a été observée dans les deux canaux à 0,1% de concentration en flux laminaire. Pour les canaux droits et hélicoïdaux, le P_{Out} le plus élevé a été atteint à environ 20,57% et 37,67%, respectivement. Cependant, les résultats obtenus pour les deux canaux

étaient différents pour des concentrations de 0,01% et 0,5% de nanofluide. Les performances de refroidissement les plus faibles pour le canal droit ont été observées pour une concentration de 0,01% tandis que la concentration de 0,5% était la plus faible pour le canal hélicoïdal.

[59] ont étudié numériquement et expérimentalement l'influence de divers nanofluides tels que l'eau de nanotube de carbone, l'eau de graphite et l'eau d'argent sur l'efficacité (η) d'un capteur solaire à absorption directe à l'échelle microscopique. Il a été noté que le η augmente significativement jusqu'à 0,5% de la fraction volumique (VF) et il diminue légèrement pour VF> 0,5%. Pour un FV constant de 0,8%, [60] ont observé l'impact de la taille des nanoparticules sur le η du collecteur. Aucune amélioration substantielle du η n'a été enregistrée avec une augmentation de la taille des nanoparticules. La raison de l'augmentation du taux de HT pour une valeur de concentration plus élevée peut être comprise par une analyse qualitative recommandée par [61, 62] ont testé l'utilisation de particules de NiO dans un nanofluide à base d'éthylène glycol. Le k du nanofluide varie en raison des températures variables dans les conditions indiennes ; dans les conditions de température ambiante, le k a été augmenté jusqu'à 59% -69% et une amélioration de 125% a été observée à 80°C.

[63] Ont examiné l'effet de trois types de nanoparticules (CuO, SiC et Al_2O_3) et de trois types de BF (éthylène glycol, glycérine et eau) sur le HT du système PVT. La chute de pression maximale (Δp) était indiquée par la glycérine tandis que la plus basse était indiquée par l'eau. L'utilisation de nanoparticules de SiC dans l'un des trois BF considérés a entraîné un coefficient de transfert de chaleur convectif (h) plus élevé que les nanoparticules de Al_2O_3 ou de CuO.

[58] ont étudié expérimentalement l'effet de la nanoparticule de BF (eau dé ionisée [DI]) et de boehmite dispersée dans l'eau DI à trois concentrations (0,01, 0,1 et 0,3% en poids) pour estimer les performances de refroidissement des micros canaux sur le module PV. La présence de nanoparticules a produit un effet extraordinaire sur la réduction de la $T_{Surface}$ par rapport au BF. Les résultats ont montré que la diminution de la température dépend de la fraction pondérale des nanoparticules. Il a été noté que pour le débit volumétrique de nanofluides (Q) de 300 ml / min à une concentration de 0,01% à travers des micros canaux, la plus forte augmentation de la puissance générée du module PV est d'environ 27%. Par rapport à la concentration la plus faible, la P_{Out} du module PV a été diminuée en augmentant davantage la concentration de nanoparticules. Cela était principalement dû à la connexion directe entre la P_{Out}du module PV et le module TPV. Par conséquent, les rendements électriques ont été réduits en raison du mauvais refroidissement η à la concentration plus élevée des nanoparticules. La raison d'un mauvais refroidissement η pourrait être due à l'activité plus élevée des nanoparticules à la surface qui se traduit par une agglomération des particules en suspension à haute concentration [61] et celle-ci s'intensifie à un m_ élevé dans le micro canal.

[64] ont estimé les performances du système PVT avec BF (eau), nanofluide Al_2O_3-eau à divers FV. L'efficacité du système PVT s'est améliorée en augmentant le Q de l'eau et a atteint la valeur la plus élevée de 32% et 40,9% à un Q de 1,2 L/min au rayonnement moyen et au rayonnement de pointe tout au long de la journée, respectivement. L'utilisation de nanofluide

Al2O3-eau a amélioré le HT et amélioré le η du système PVT. La concentration optimale de nanofluide Al_2O_3-eau a été notée à une concentration de 0,1%, ce qui a diminué le module TPV de 8,6 C et 10 C à la moyenne et au pic G de la journée, respectivement. Les rendements globaux du système PVT étaient respectivement de 56,16% et 74,17% au rayonnement moyen et au rayonnement maximal au cours de la journée.

[65] Ont étudié expérimentalement l'effet du nanofluide Fe_3O_4-eau (avec des concentrations de 1% et 3% en poids) sur le η_{Ov} d'un système PVT. Pour générer deux G constants (1100W/m^2 et 600W/m^2), un simulateur solaire a été utilisé pour effectuer les tests en intérieur. Sous l'effet d'un champ magnétique externe, les propriétés thermophysiques et rhéologiques peuvent être modifiées en raison d'une caractéristique particulière des ferrofluides. Les ferrofluides ont été placés dans la section de refroidissement sous des champs magnétiques constants et alternatifs pour explorer l'impact des deux formes de champs magnétiques sur le η_{Ov} du système PVT. On a vu qu'avec l'utilisation de 3% de concentration, le η_{Ov} du système amélioré de 45% et le η_{Ov} amélioré d'environ 50% par rapport au BF tout en ajoutant un champ magnétique alternatif de fréquence 50Hz.

[66] Ont préparé et mesuré les propriétés thermophysiques du nanofluide et propylène glycol-eau pour une collection supérieure de SE. L'amélioration k de 16,3% et la baisse de viscosité de 47% ont été observées pour une concentration volumique de 2% à 28°C. Les interactions de soutien entre le sable et le propylène glycol ont provoqué une diminution de la viscosité du sable-propylène glycol-eau nanofluides.[67] Ont étudié un collecteur PVT avec des nanoparticules de Cu9S5 dans la solution d'oléylamine comme filtre optique. Les résultats ont indiqué que le η_{El} de la cellule PV à base de Si peut être amélioré lorsque le nanofluide Cu9S5 est utilisé comme filtre optique dans le collecteur. Le η_{Ov} maximum atteint par le présent collecteur PVT était de 34,2%, ce qui est 17,9% plus élevé que le PVT sans filtre.

[68] Ont comparé le η d'un système PVT hybride avec trois nanoparticules (Al_2O_3, CuO et MWCNT) à différentes concentrations dans l'eau. La réduction du module TPV était d'environ 19% pour MWCNT et CuO. L'augmentation du η_{El} par rapport au module PV autonome était de 60%, 55% et 52% pour les nanofluides à base de MWCNT, Al_2O_3 et CuO, respectivement. Ainsi, les performances du MWCNT sont plus attractives que celles d'Al_2O_3 et CuO.

[69] Ont évalué les performances d'un système PVT hybride avec l'utilisation simultanée de PCM (RT-35HC) et de nanofluide (graphène-eau). L'expérience a été menée à Taxila, au Pakistan, sur un module photovoltaïque monocristallin de 30 W. Dans l'expérience, plusieurs cas tels que PV/PCM, PV/PCM-nanofluide dans une configuration en boucle fermée de tube de cuivre à différentes concentrations (0,05%, 0,1% et 0,15%) sont comparés à un seul module PV autonome. Le résultat a révélé que la meilleure performance a été atteinte pour le cas d'une concentration de graphène de 0,1% en volume à un débit de 40 L/min. La réduction la plus élevée du module TPV a été suivie par 11,9 C, 16,1 C et 23,2 C; en conséquence, la plus forte augmentation de η_{El} était de 9,1%, 22,7% et 23,9% pour le système PV/PCM, le système PVT/PCM à base d'eau et le système PVT/PCM à base de nanofluides, respectivement, par rapport au module PV autonome.

[68] Ont comparé le η d'un système PVT hybride avec trois nanoparticules (Al_2O_3, CuO et MWCNT) à différentes concentrations dans l'eau. La réduction du module TPV était d'environ 19% pour MWCNT et CuO. L'augmentation du η_{El} par rapport au module PV autonome était de 60%, 55% et 52% pour les nanofluides à base de MWCNT, Al_2O_3 et CuO, respectivement. Ainsi, les performances du MWCNT sont plus attractives que celles d'Al_2O_3 et CuO. Hassan *et al*. Ont évalué les performances d'un système PVT hybride avec l'utilisation simultanée de PCM (RT-35HC) et de nanofluide (graphène-eau). L'expérience a été menée à Taxila, au Pakistan, sur un module photovoltaïque monocristallin de 30 W. Dans l'expérience, plusieurs cas tels que PV / PCM, PV/PCM-nanofluide dans une configuration en boucle fermée de tube de cuivre à différentes concentrations (0,05%, 0,1% et 0,15%) sont comparés à un seul module PV autonome. Le résultat a révélé que la meilleure performance était atteinte pour le cas d'une concentration de graphène de 0,1% en volume à un débit de 40 L/min. La réduction la plus élevée du module TPV a été suivie par 11,9 C, 16,1 C et 23,2 C; en conséquence, la plus forte augmentation de η_{el} était de 9,1%, 22,7% et 23,9% pour le système PV/PCM, le système PVT/PCM à base d'eau et le système PVT/PCM à base de nanofluides, respectivement, par rapport au module PV autonome.

5.1.3. Etude numérique sur le refroidissement des modules PV avec des nanofluides :

[70] ont analysé numériquement l'effet du nanofluide Al_2O_3-eau sur les cellules photovoltaïques à concentration (CPV). Les effets de la hauteur des canaux, du VF des nanoparticules et de la température du nanofluide d'entrée ont été analysés sur les performances du système. Il a été noté que l'augmentation de la concentration de nanoparticules et une température d'entrée inférieure du nanofluide améliorent le η_{El} de la cellule PV. L'augmentation du nombre de Reynolds d'entrée (Re) pour le nanofluide Al_2O_3-eau a amélioré le η_{El} de la cellule avec un taux très élevé à Re inférieur, mais à un Re plus élevé, le η_{El} de la cellule a amélioré la vitesse de ralentissement.

[71] ont étudié les performances de refroidissement du nanofluide Al_2O_3-eau pour le module PV. Il a été observé que le nombre de Nusselt (Nu) augmente avec une augmentation de la concentration de nanoparticules. L'augmentation du Nu moyen était plus à Re inférieur pour la même concentration de nanoparticules qu'à Re plus élevé en régime laminaire. [72] Ont analysé les effets des nanofluides sur les performances du système PVT. L'eau pure, le nanofluide Ag-eau et le nanofluide Al_2O_3-eau étaient les fluides de refroidissement utilisés dans la simulation.

L'influence de la fraction volumique VF des nanoparticules et de la vitesse d'entrée du fluide sur les rendements exergétiques et énergétiques ont été étudiées. Il a été confirmé qu'il existe une augmentation de h et une diminution de la chaleur spécifique des nanofluides, avec une augmentation de la concentration de nanoparticules dans le BF. La différence de température d'entrée et de sortie du collecteur diminuait avec une augmentation de la vitesse du fluide d'entrée à une concentration constante. Cette baisse de la température d'entrée et de sortie du collecteur due à un temps de séjour moindre du nanofluide à vitesse d'entrée élevée, mais

l'augmentation de la vitesse d'entrée du fluide a interdit la perte de η_{El} en diminuant la température de la plaque absorbante.

[73] ont examiné les effets de l'eau pure et du nanofluide ZnO/eau sur le η_{Th} et le η_{El} d'un système PVT. L'approche de Taguchi a également été utilisée pour évaluer le meilleur résultat du système PVT basé sur le nanofluide. Les paramètres considérés comprennent T_{amb}, la vitesse du vent, le rayonnement solaire absorbé, le débit du liquide de refroidissement, la température d'entrée du liquide de refroidissement et la fraction massique de la nanoparticule. L'analyse de Taguchi confirme que la température d'entrée du liquide de refroidissement est le facteur le plus critique pour les performances du système PVT basé sur les nanofluides.

[74] ont étudié l'effet de différents arrangements d'écoulement à l'intérieur des micros canaux sur les performances d'un modèle PVT hybride. Le modèle se compose d'un module PV, d'un dissipateur de chaleur et d'un micro canal avec trois types d'arrangement d'écoulement (écoulement parallèle; contre-courant de deux chemins; et contre-courant de quatre chemins). Les performances du système PVT hybride avec différentes dispositions d'écoulement du micro canal, avec une zone différente rapport (surface du dissipateur de chaleur à la surface du module), est comparé au nanofluide SiC-eau. Les résultats ont révélé que le micro canal avec un agencement d'écoulement parallèle atteint un module TPV inférieur qui présente un η_{El} maximum que l'agencement à contre-courant à Re inférieur. Cependant, un module TPV plus uniforme a été observé sur une disposition à contre-courant à Re inférieur.L'augmentation du rapport de surface, au-dessus de 7, n'a pas d'influence significative sur les performances PV.

[75] ont étudié les effets des types de nanofluides et de la VF des nanoparticules sur le module TPV, les puissances η_{El}, électriques et thermiques. Un modèle mathématique de collecteur PVT a été étudié avec des nanofluides Al_2O_3-eau et TiO_2-eau. Il a été analysé que la performance du collecteur PVT utilisant le nanofluide Al_2O_3-eau est supérieure à celle du nanofluide TiO_2-eau. La recherche a montré que le diamètre du tube du collecteur avait un effet important sur le module TPV. Dans le modèle proposé, trois diamètres du tube ont été comparés (0,005 m, 0,008 m et 0,015 m) et la température la plus basse est enregistrée à un diamètre de 0,005 m ainsi, le η_{El} maximum est atteint à ce diamètre.

5.2. Etat de l'art sur le nanofluide eau-TiO_2 :

5.2.1. Synthèse et Stabilité du Nanofluide TiO_2 :

Le principal obstacle ou défi dans la préparation de nanofluides tels que les nanofluides de TiO_2 est d'assurer la stabilité et la durabilité à long terme des nanoparticules en suspension. Le cluster (agglomération) de nanoparticules est formé en raison de l'attraction mutuelle des nanoparticules. Lorsque la force de van der Waals est dominante par rapport à la force de répulsion, les nanoparticules commencent à s'agglomérer comme illustré sur la figure 6-10.

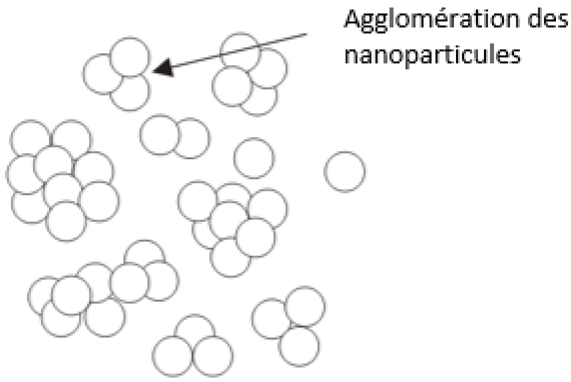


Figure 5- 10:Agglomération des nanoparticules dans le fluide de base*[76]*.

La stabilité de la suspension colloïdale et des nanofluides peut être expliquée davantage en utilisant la théorie de Derjaguin-Landau Verwey-Pverbeek (DLVO) [77, 78]. L'énergie d'interaction totale entre les particules $V_T(H)$ en fonction de la distance entre les particules, H, est présentée dans l'équation 5.1. C'est la somme entre l'énergie attractive, $V_A(H)$ et répulsive, $V_R(H)$

$$V_T(H) = V_A(H) + V_R(H)$$ **Eq 5. 1**

Les particules sont empêchées de s'agglomérer lorsque l'énergie ou la force répulsive est supérieure à l'énergie attractive. L'énergie attractive et potentielle entre deux particules sphériques, VA, de rayon égal, a, est représentée dans l'équation 6.2.

$$V_A(H) = -\frac{aA}{12H}$$ **Eq 5. 2**

où H>>a. Le symbole a représenté la constante de Hamaker tandis que a et H désignent respectivement le rayon des particules et la distance surface à surface. L'énergie potentielle répulsive, V_R, est décrite par l'équation 5.3.

$$V_R = 2\pi\varepsilon a\psi_0^2 \, ln[1 + exp\,(-kH)]$$ **Eq 5. 3**

où ε est la permittivité moyenne, a est le rayon de la particule, ψ_o est le potentiel de surface de la particule et k^{-1} est la longueur de Debye.

En dehors de cela, la sédimentation des particules est également souvent observée lorsque la suspension est laissée dans un état statique pendant une longue période de temps Figure 5-11. L'effet de la force gravitationnelle sur les nanoparticules est la raison de ce cas.

Théoriquement, la loi de Stokes peut être utilisée pour décrire la vitesse de sédimentation, V d'une particule sphérique dans un liquide[77]. Ceci est décrit dans l'équation 5.4.

$$V = \frac{2R^2}{9\eta}(\rho_p - \rho_L)g \qquad \textbf{Eq 5. 4}$$

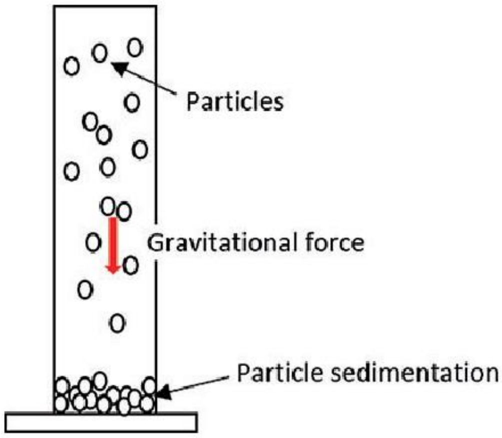


Figure 5- 11:Précipitation des nanoparticules dans le fluide de base*[76]*.

Où R est le rayon de la particule ; η est la viscosité du liquide ; ρ_p est la densité de la particule tandis que la densité du liquide est représentée par ρ_L; g représente l'accélération gravitationnelle. La diminution de la vitesse de sédimentation conduit à une meilleure stabilité des nanofluides [79, 80]. Basé sur l'équation 5.4, une taille plus petite des nanoparticules et un fluide de base à haute viscosité diminuent la vitesse de sédimentation. Une plus petite valeur de l'écart entre la densité de la particule et du fluide de base diminue également la vitesse de sédimentation. Néanmoins, des facteurs tels que la structure et la taille complexes des particules, l'ajout de dispersant ou de surfactant et la méthode de synthèse des nanofluides affecteront la validité de l'application de la loi de Stokes [81].

Les nanofluides peuvent être synthétisés par deux approches, à savoir les méthodes en une seule étape et en deux étapes. Dans le procédé en une seule étape, les processus de fabrication et de dispersion de nanoparticules dans un fluide de base sont réalisés simultanément. L'avantage d'utiliser cette méthode est la minimisation de l'agrégation des particules, ce qui se traduit par une amélioration de la stabilité des nanofluides. De plus, des activités telles que le séchage, le stockage, le transport et la dispersion de nanoparticules ne sont pas requises dans cette méthode. [82] Ont rapporté que cette méthode est préférable pour les métaux hautement conducteurs tels que le cuivre (Cu) pour éviter l'oxydation des particules pendant le processus de synthèse. Au cours du processus de synthèse de nanofluides à base d'éthylène glycol (EG) de Cu, les poudres nano phase sont condensées de la phase vapeur directement dans l'éthylène glycol à basse pression de vapeur qui s'écoule dans une chambre à vide. [83] Ont utilisé un système de synthèse de nanoparticules par projection d'arc qui est intégré à une vibration ultrasonique et à une électrode rotative pour fabriquer des nanofluides de TiO2. Dans cette méthode, la masse de titane agit comme une électrode. Les nanoparticules requises sont produites par une approche de chauffage à arc étincelant, et ces nanoparticules sont ensuite condensées en liquide dans une chambre à vide. Les inconvénients du procédé en une seule étape sont un coût de production élevé, inadapté à la production en vrac car seule une petite

quantité de nanofluides peut être produite, et nécessite un environnement sous vide et un fluide de base à faible pression de vapeur.

La méthode en deux étapes est souvent utilisée pour préparer des nanofluides de TiO_2. La figure 5-12 résume le processus typique de la méthode en deux étapes pour préparer des nanofluides de TiO_2.

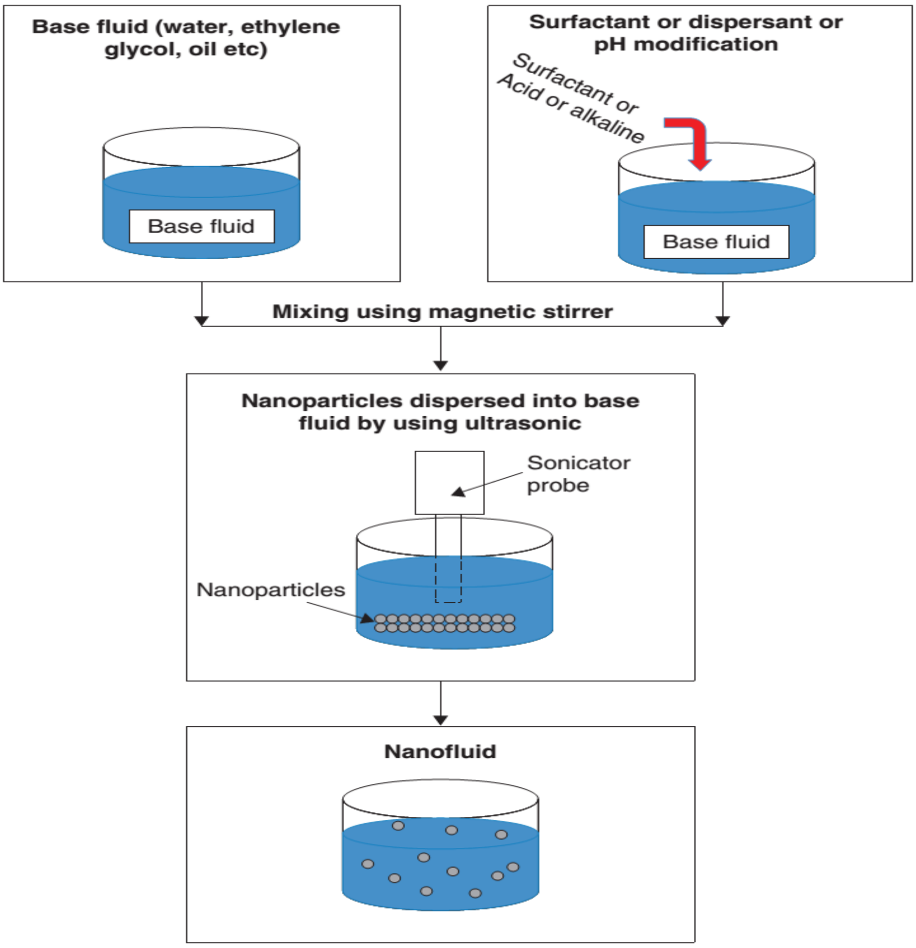


Figure 5- 12:Méthode de deux étapes souvent utilisée pour la préparation du nanofluide TiO_2*[76]*.

Comme le montre la figure 5-12, un tensioactif ou un dispersant est ajouté dans le fluide de base. Le surfactant est classé en quatre catégories, à savoir, anionique (charge négative), cationique (charge positive), non ionique (neutre) et enfin amphotère (charge positive et négative). Les tensioactifs qui ont été utilisés pour produire des nanofluides de TiO_2 sont l'acide oléique [84, 85], la poly-vinylpyrrolidone (PVP)[86, 87], le bromure de acétyletri méthyl ammonium (CTAB) , l'acide acétique (AA) , le dodécyl de sodium. Sulfate (SDS) [84], Tween-20 [86] et polyéthylène glycol 600[88].

Il existe deux mécanismes de stabilisation dus à l'ajout de tensioactif. Le premier est la stabilisation stérique. Dans ce mécanisme, les molécules du tensioactif seront adsorbées dans la surface des nanoparticules et par conséquent, une force stérique répulsive est développée. Les nanoparticules sont empêchées de se rapprocher les unes des autres en raison de cette

force. L'autre mécanisme est connu sous le nom de stabilisation électrostatique. Le tensioactif se dissocie en ions et s'adsorbe à la surface des particules où la charge de surface des nanoparticules sera augmentée. Outre le surfactant, la charge superficielle des nanoparticules peut être modifiée en modifiant le pH du fluide de base (stabilisation électrostatique). En raison de ce mécanisme, les forces répulsives entre les nanoparticules surmontent les forces d'attraction des nanoparticules [89]. L'utilisation d'une sonde ou d'un bain à ultrasons est souvent utilisée pour disperser les nanoparticules dans le fluide de base. Cet instrument est un outil puissant pour décomposer l'agglomération des nanoparticules.

5.2.1. Impact sur l'environnement et la santé :

Le dioxyde de titane (TiO_2) est un ingrédient essentiel et important pour des centaines de produits, dont des peintures, plastiques, papiers, cosmétiques, produits pharmaceutiques et alimentaires. Du fait de ses propriétés, le dioxyde de titane est utilisé dans de nombreuses applications allant des colorants blancs aux filtres de crèmes solaires et même à la lutte contre la pollution.

Depuis un siècle environ, le dioxyde de titane est utilisé dans une multitude de produits. Son processus de fabrication et l'ensemble de ses applications ont été évalués à de multiples reprises. Ces évaluations ont mené à l'homologation du dioxyde de titane par les autorités réglementaires compétentes.

Le dioxyde de titane, qui est produit et utilisé dans des applications commerciales en toute sécurité depuis près d'un siècle dans un large éventail de secteurs, a apporté des bénéfices conséquents à la société, sans effets nocifs sur l'homme ou l'environnement.

Les études à long terme ont démontré que la consommation, l'utilisation et la production du dioxyde de titane ne sont pas nocives pour les êtres humains, et de nombreux organismes de régulation ont déterminé qu'il était non toxique et non cancérigène pour l'homme. (https://tdma.info/fr/le-dioxyde-de-titane-est-sans-danger/)

5.3 Applications du nanofluide eau-TiO_2 dans les capteurs hybrides (PV/T) :

Dans le tableau ci-dessous on cite quelques travaux de recherches expérimentales et numériques dont le nanofluide utilisé est le TiO_2-eau avec diverses concentrations ainsi que certaines corrélations les plus utilisées.

Tableau 5- 1: Travaux de Recherches sur les PV/T dont le Fluide de Refroidissement et le Nanofluide Eau-TiO_2.

Référence	Régime d'écoulement	Type de Nanoparticule	Type de Fluide de Base	Modèle de Conductivité	Modèle de viscosité	Concentration	Diamètre de Particule (nm)	Surfactant	Méthode de Recherche	Réalisation Principale
[90]	Laminaire	Al_2O_3, TiO_2, SiO_2, CuO	Eau	Hamilton-crosser	NS	0-4 vol %	NS	NA	Ana	ηI,CuO> autres +22.15% en *hfi* −4.34% en *Sgen*
[91]	Laminaire et Turbulent	TiO_2	Eau	NS	NS	0-0.3 wt %	20	NU	Exp	Un débit inférieur a entraîné une amélioration plus élevée. Le surfactant a diminué l'efficacité.
[92]	Turbulent	Al_2O_3, TiO_2, SiO_2, CuO	Eau	Xuan	Corcione	0-4 vol %	25	NA	Ana	NuAl_2O_3> autres *T*out,Cu> autres *Sgen*,*TiO_2*< autres

Suite Tableau 5-1

Référence	Régime d'écoulement	Type de Nanoparticule	Type de Fluide de Base	Modèle de Conductivité	Modèle de viscosité	Concentration	Diamètre de Particule (nm)	Surfactant	Méthode de Recherche	Réalisation Principale
[93]	Laminaire	TiO_2	Eau : PLE	Mesuré	Mesuré	0.1 et 0.3vol %	21	PEG400	Exp	+34.5% en ηI +6% en *k*
[94]	Laminaire	TiO_2	Eau et Eau : EG	Mesuré	Mesuré	2.3 vol %	21	CTAB	Num et Exp	+21% en *hf,i*
[95]	Laminaire	MWCNT, Graphéne, CuO, Al_2O_3, TiO_2, et SiO_2,	Eau	Mesuré	Mesuré	0-2.25 vol %	7,20,42,45,44 et 10	Triton X-100	Exp	+23.47% en ηI +29.32% en ηII
[96]	NS	Al_2O_3, TiO_2	Eau	NC	Brinkmann	0.1 wt %	20+15	CTAB	Num et Exp	+26% en ηI
[97]	NS	TiO_2	Eau	NC	Mesuré	2 wt %	NC	Triton X-100	Exp	+12.47% en ηI

Suite Tableau 5-1

Référence	Régime d'écoulement	Type de Nanoparticule	Type de Fluide de Base	Modèle de Conductivité	Modèle de viscosité	Concentration	Diamètre de Particule (nm)	Surfactant	Méthode de Recherche	Réalisation Principale
[98]	Turbulent	Al_2O_3, TiO_2, ZnO	Eau	Maxwell	Einstein	0.1 vol %	NS	NA	Modélisation	Le nombre moyen d'élévateurs fonctionne mieux

NA : non applicable NC : non considéré NS : non spécifié NU : non utilisé Exp : expérimentale Ana : analytique Num : Numérique Theo : Théorique

5.4. Les propriétés thermophysiques du nanofluide eau-TiO_2 :

L'incorporation de nanoparticules dans le fluide de base entraîne une modification des propriétés thermophysiques telles que la conductivité thermique, la viscosité et la chaleur spécifique qui affectent le transfert de chaleur par convection. Différents nanomatériaux changent leurs paramètres dans une mesure différente.

La concentration de nanoparticules, le niveau de pureté, la forme et la taille des nanomatériaux sont quelques-uns des principaux facteurs qui modifient considérablement les propriétés thermophysiques. Cette section présente l'examen à jour des propriétés thermophysiques de différents fluides de base et nanoparticules ainsi que des facteurs affectant la conductivité thermique.

5.4.1. Conductivité thermique :

De nombreuses expériences ainsi que des recherches théoriques ont été menées pour étudier le changement de conductivité thermique des nanofluides. L'ajout de nanoparticules dans un fluide conventionnel augmente la conductivité thermique. Ceci est dû au mouvement brownien (Figure 5.13) qui est un mécanisme clé contrôlant le comportement thermique des nanoparticules – suspensions fluides. La deuxième raison est la couche inter faciale (nanocouche), c'est-à-dire les molécules liquides (Figure 5.14) proches d'une surface de particules solides forme des structures en couches. Ces structures en couches agissent comme un pont thermique entre les nanoparticules et un liquide en vrac et augmentent la conductivité thermique. Il y a peu de lien entre cette nanocouche et les propriétés thermiques des suspensions solides / liquides. Ces molécules en couches sont présentes dans un état physique intermédiaire entre un liquide en vrac et une particule solide. La nanocouche solide de molécules liquides est susceptible d'augmenter la conductivité thermique plus que le fluide conventionnel en vrac [99].

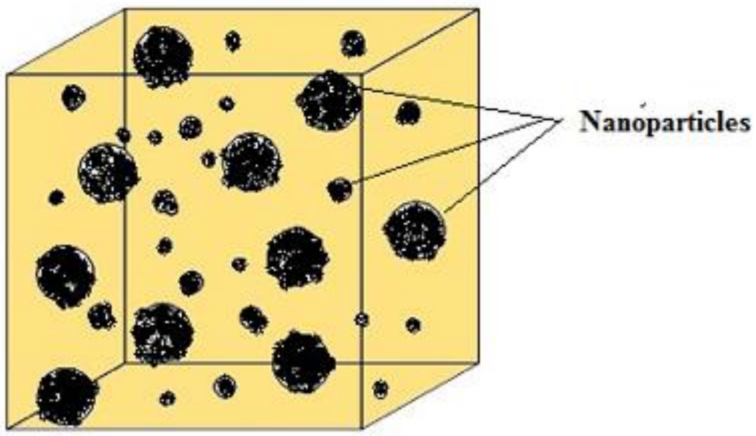


Figure 5- 13: Mouvement Brownien des nanoparticules.

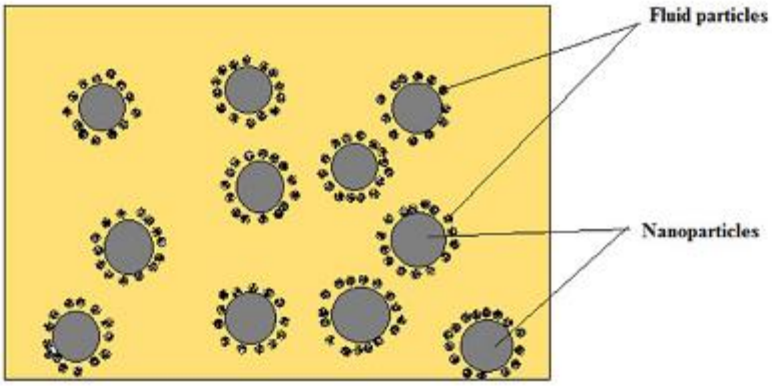


Figure 5- 14:Structure nanofluide composée de nanoparticules.

Des études montrent que la conductivité thermique des nanofluides est supérieure à celle des fluides de base [100-102]. La conductivité thermique des nanofluides peut être mesurée par diverses techniques, à savoir, un appareil à fil chaud transitoire, un analyseur de constantes thermiques à disque chaud. Les chercheurs ont réalisé des expériences en prenant différents fluides de base (éthylène glycol, propylène glycol, méthanol, glycérol, huile pour engrenages, huile moteur, paraffine, etc.) et avec différentes nanoparticules.

1. Le fluide de base :

1.1. L'eau :

[103] Ont utilisé des nanoparticules de TiO_2 en forme de bâtonnet et de forme sphérique et ont préparé des nanofluides en dispersant ces nanoparticules dans de l'eau désionisée. Le résultat expérimental a montré une amélioration de la conductivité thermique avec une augmentation des charges de particules (0,5 à 5% en volume) et est affectée par la taille et la forme des particules. Les résultats de la conductivité thermique pour les nanofluides TiO_2 (15 nm) -eau ont montré une amélioration de 29,70% avec une fraction volumique de particules de 5% et une conductivité thermique pour les nanofluides TiO_2 (ϕ 10 nm × 40 nm) -eau ont montré une amélioration de 32,80% à la même fraction volumique. . Les nanoparticules en forme de bâtonnet ont montré plus d'améliorations par rapport à une forme de sphère. [104] ont mesuré la conductivité thermique de nanoparticules de TiO_2 pour 0,2 à 2% en volume dispersé dans l'eau. La conductivité thermique des nanofluides augmentait à mesure que la charge et la température des particules (comprises entre 15 ° C et 35 ° C) augmentaient.

[105] ont réalisé un benchmark international de référence sur les propriétés des nanofluides (INPBE), mesurant la conductivité thermique d'échantillons correspondants de nanofluides colloïdalement stables de trente organisations à travers le monde, en utilisant des approches expérimentales comme la méthode du fil chaud transitoire, l'état d'équilibre (steady-state) et les méthodes optiques. Ils ont examiné des nanofluides ayant un fluide de base aqueux et non aqueux, des particules de métal et d'oxyde métallique, différentes formes (particules quasi sphériques/allongées) et différentes concentrations de particules. Il a été conclu que les données de la plupart des groupes se situent dans une plage de ± 10% ou même moins) autour de la moyenne de l'échantillon avec quelques valeurs aberrantes. La conductivité thermique a

montré une augmentation avec la concentration de particules, le rapport d'aspect. Les nanofluides testés dans cet exercice ont montré que la théorie du milieu efficace développée par [106] est assez bonne pour prédire la conductivité thermique. Les expériences portaient sur une seule nanoparticule métallique et ont été utilisées à très faible concentration. Cependant, l'effet de la température n'a pas été pris en compte.

[107] ont examiné l'effet de la variation des valeurs de pH sur la conductivité thermique du nanofluide Al_2O_3–H_2O. Ils ont observé que la stabilité et les améliorations de la conductivité thermique des nanofluides Al_2O_3 – H2O sont extrêmement dépendantes des valeurs de pH et des différentes concentrations de dispersant SDBS des nano-suspensions. La conductivité thermique s'est améliorée grâce à l'ajout d'un dispersant SDBS optimisé. Le traitement combiné avec le pH et le dispersant chimique a été recommandé pour améliorer la conductivité thermique. Le résultat de la conductivité thermique a montré une amélioration maximale de 10,1% à la suspension de 0,15% en poids de nanoparticules.

[108] ont étudié l'effet des particules (chargement et taille), la température sur le rapport de conductivité thermique des nanofluides alumine (Al_2O_3)/eau. Les résultats ont montré que la conductivité thermique s'est améliorée avec de petites nanoparticules, une température élevée et une fraction pondérale élevée.[109] Ont également effectué des expériences similaires. Ils ont préparé des nanoparticules d'Al_2O_3 en utilisant la méthode de précipitation chimique assistée par micro-ondes et les ont dispersées dans de l'eau distillée à l'aide d'un sonicateur. La conductivité thermique des nanofluides a été mesurée à température ambiante pour différentes charges de particules (0,33 à 5%). Il a été conclu que la conductivité thermique augmente avec la concentration volumique des nanoparticules. Les résultats montrent que l'amélioration de la conductivité thermique de 9,7% a été observée pour une concentration volumique de 3%.[110] Ont utilisé la technique de réduction de l'hydrogène pour préparer les nanofluides hybrides Al_2O_3 – Cu/eau à partir du mélange de poudre d'Al_2O_3 et de CuO dans un rapport de proportions pondérales de 90:10. Le résultat expérimental de la conductivité thermique a montré une amélioration la plus élevée de 12,11% pour une concentration volumique de 2%. Les nanoparticules hybrides ont montré une meilleure augmentation de la conductivité thermique que les nanoparticules d'Al_2O_3.

[111] ont utilisé des nanofluides Cu-H_2O à différentes fractions de poids et ont observé que la conductivité thermique était extrêmement dépendante du pH et du tensioactif de sodium dodécyl benzène sulfonâtes (SDBS). Une amélioration de la conductivité thermique de 10,7% a été observée à une fraction pondérale de 0,001 (0,1% en poids) de nanoparticules de Cu avec une concentration optimale de SDBS et avec une valeur de pH optimale.

[112] ont étudié la conductivité thermique des structures de nanotubes de carbone (CNT) dans les nanofluides à base d'eau, ainsi que l'effet des variations de température et de temps. Cinq structures différentes, à savoir SWNT (simple paroi CNT), DWNT (double paroi CNT), FWNT (peu de paroi CNT) et deux multi-parois différentes ont été utilisées dans cette étude. Les résultats de la distribution de taille zêta et de la conductivité thermique indiquent que la conductivité thermique diminue avec une augmentation du nombre de parois de nanotubes.

[113] ont utilisé les nanofluides Fe_3O_4 pour étudier la conductivité thermique. Ils ont effectué des expériences envisageaient la concentration volumique varie de 0,0% à 2,0% et la température plage de 20 à 60°C. Les résultats ont montré que la conductivité thermique dépendait clairement de la concentration volumique et de la température des particules. Elle a augmenté avec une augmentation de la concentration volumique des particules et a montré une amélioration maximale de 48% avec une concentration volumique de 2,0% à une température de 60°C par rapport au fluide de base.

[114] ont étudié expérimentalement la conductivité thermique des mélanges NH_3 et H_2O (fractions massiques d'ammoniac de 0,10 à 0,50) à des températures comprises entre 293,15 K et 313,15 K. Le résultat a montré que la conductivité thermique des mélanges NH_3+H_2O augmentait avec l'augmentation de la température et diminuer avec la fraction massique d'ammoniac.

[115] ont mesuré l'augmentation de la conductivité thermique des particules de nanodiamants (ND) en suspension dans des particules purement désionisée (DI) avec différentes charges dans la gamme de 0,8% à 3% en volume. Dans cette étude, l'amélioration de la conductivité thermique de 7,2% a été obtenue avec 3% en volume des nanoparticules de nano-diamant à une température de 30 ° C. À une température plus élevée, (50°C) la conductivité thermique a montré une amélioration jusqu'à 9,8%.

[116] ont étudié la conductivité thermique de nanoparticules de graphène pour différentes concentrations de 0,01 à 0,2% vol à différentes températures. On a constaté que la conductivité thermique s'améliorer avec l'augmentation de la concentration de graphite et au maximum une amélioration de 27% a été observée à une concentration de 0,2%.

Récemment, [117] ont développé un modèle pour prédire la conductivité thermique effective des nanofluides en incluant l'effet de la nanocoque formée par les molécules de fluide autour des nanoparticules. La conductivité thermique effective prédite par le présent modèle ainsi que le rapport des conductivités thermiques de la particule et du liquide et leurs fractions volumiques relatives, prennent également en compte le rayon des nanoparticules et la conductivité thermique et l'épaisseur de la nano-coquille inter-faciale qui ne sont pas pris en compte dans les méthodes traditionnelles des modèles.

[118] ont synthétisé des nanofeuilles d'oxyde de graphène (GO) par la méthode Hummers modifiée pour former des nanofluides GO/eau homogènes et stables et étudié les effets de la concentration et de la température des nanoparticules sur la conductivité thermique. Il a été observé qu'au chargement de nanofeuilles de 0,25% en poids, le taux de rehaussement est de 33,9% à 20°C et 47,5%. à 40°C respectivement, montrant la dépendance de la température dans la plage de température mesurée.

[55] ont étudié expérimentalement la synthèse, thermique conductivité, viscosité et phénomène d'hystérésis de Al_2O_3/eau & Nanofluides TiO_2/eau à des concentrations de 0,05 à 0,3% v/v) à des températures (25–80°C). La conductivité thermique augmente avec la concentration croissante de particules.

[119] ont mesuré expérimentalement la conductivité thermique, la viscosité ainsi que le coefficient de transfert de chaleur turbulent du nanofluide oxyde de magnésium–eau dans un tuyau circulaire, à faible concentration de nanoparticules (0,0625, 0,125, 0,25, 0,5 et 1% en volume). Ils ont observé que les modèles n'ont pas réussi à prédire correctement la conductivité thermique.

En outre, [120] ont réalisé une étude expérimentale pour étudier l'écoulement turbulent de nanofluides MWCNT/eau fonctionnalisés COOH circulant à travers un échangeur de chaleur à double tube. Une nouvelle corrélation a été proposée en fonction de la température et de la concentration afin de prédire la conductivité thermique.

[121] ont étudié le coefficient de transfert de chaleur par convection d'échangeur de chaleur tubulaire utilisant de nouveaux nanofluides hybrides TiO_2–CNT sous flux laminaire. Ils ont étudié les effets de la température et de la fraction massique sur le transfert de chaleur par convection. Les résultats suggèrent que la conductivité thermique effective du nanofluide hybride a été trouvée environ 21,5% plus élevée que celle du fluide de base.

1.2. L'Éthylène glycol :

[122] ont examiné l'amélioration de la conductivité thermique des nanotubes de carbone à parois multiples à base d'huile moteur synthétique (MWNT) et des nanotubes de carbone à parois multiples à base d'éthylène glycol avec une augmentation de la concentration volumique des nanoparticules. Pour la concentration volumique de 1% pour le CNT-éthylène glycol, la valeur d'amélioration de la conductivité thermique était jusqu'à 12,4%, tandis que pour la suspension d'huile moteur synthétique CNT, la valeur d'amélioration de la conductivité thermique était jusqu'à 30% à la concentration volumique de 2%.

[123] ont observé que l'amélioration de la conductivité thermique des nanofluides ZnO-EG dépendait de la température. La conductivité thermique a augmenté avec l'augmentation des températures de 10 à 60°C, bien que les rapports améliorés soient constants. L'amélioration de la conductivité thermique des nanofluides ZnO-EG dépendait également de la concentration des particules, et elle augmente de manière non linéaire avec la fraction volumique des nanoparticules. L'amélioration maximale de 26,5% a été observée pour les nanofluides ZnO-EG avec 5,0% en volume de nanoparticules.

[124] ont préparé des nanoparticules d'Al-5% en poids de Zn par alliage, et ces nanoparticules de 0,01 à 0,10% en volume dispersées dans l'éthylène glycol. Il a été observé que la conductivité thermique des nanofluides dépend fortement de la concentration volumique, de la taille des particules, de la température du fluide et de la stabilité des nanoparticules dispersées dans le fluide de base. Une amélioration de la conductivité thermique de 16% a été observée pour les nanofluides dispersés Al95 Zn05 avec une concentration volumique de 0,10%.

[125] ont développé une technique simpliste pour produire des nanofluides à base d'éthylène glycol comportant des nanofeuilles de graphène. Les résultats a montré que la conductivité thermique du fluide de base augmentait considérablement en dispersant des nanofeuilles de

graphène, et la valeur d'amélioration de la conductivité thermique a été remarquée jusqu'à 86% pour une dispersion de graphène à 5,0% en volume. Il a été conclu que la géométrie bidimensionnelle, le rapport hauteur/largeur élevé et la rigidité du graphène et de l'oxyde de graphène ont montré l'effet sur la conductivité thermique des nanofluides et ont contribué à augmenter la propriété de transport thermique des nanofluides concernés.

[126] ont découvert expérimentalement que les nanoparticules de nitrure d'aluminium (AlN) étaient un additif fin pour augmenter la conductivité thermique des fluides conventionnels. À un chargement de particules de 0,1, le les rapports d'amélioration de la conductivité thermique étaient de 38,71% et 40,2%, respectivement, pour l'éthylène glycol et le propylène glycol comme fluides de base.

[127] ont prédit la conductivité thermique de nanotube de carbone (MWCNT)/eau, CuO/eau, SiO_2/eau et CuO/éthylène glycol(EG). L'amélioration de la conductivité thermique des nanofluides MWCNT à base d'eau à une concentration volumique de 0,01 a augmenté jusqu'à 11,3%. Les résultats ont clairement indiqué que la conductivité thermique des nanofluides dépend de la conductivité thermique des particules en suspension et des fluides de base.

[128] ont mesuré la conductivité thermique de fluides caloporteurs courants en utilisant 0,2 à 1,5% en volume de nanoparticules Al_2Cu et Ag_2Al préparées en nanofluides en les dispersant dans de l'eau et de l'éthylène glycol. Le les résultats ont montré que l'amélioration de 50 à 150% de la conductivité thermique des nanofluides. L'augmentation du rapport de conductivité dépend fortement de la composition, de la taille des nanoparticules, de la fraction volumique et des propriétés thermiques des nanoparticules solides en suspension.

[129] ont mesuré expérimentalement la conductivité thermique de Al_2O_3, CuO, ZnO dans un fluide de base de 60:40 (en masse) mélange d'éthylène glycol et d'eau. Le chargement volumétrique des particules de 10% et une plage de température de 298 à 363K ont été utilisés dans les expériences. Les observations ont montré que la conductivité thermique dépend de la concentration volumétrique des particules et de la température. Il augmente avec l'augmentation de la concentration volumétrique et de la température.

[130] ont préparé les trois nanofluides avec les combinaisons de nanoparticules d'éthylène glycol-eau et de TiO_2 et a étudié la conductivité thermique de ces nanofluides. Les nanofluides étaient préparées de trois manières différentes, (1) Nanoparticules dispersées dans l'eau comme fluide de base, (2) Nanoparticules dispersées dans l'éthylène glycol et l'eau dans le rapport 40: 60, et (3) Nanoparticules dispersées dans l'éthylène glycol et l'eau dans le rapport de 50:50 en poids. Les résultats ont montré que la conductivité thermique des nanofluides de TiO_2 augmente avec l'augmentation du pourcentage de concentration volumique de TiO_2 de 0,2% à 1,0% et avec une plage de température de 30 à 70 ° C. L'amélioration de la conductivité thermique maximale de 5,01% a été obtenue pour les nanofluides de TiO_2 à base d'eau avec 1,0% de nanoparticules à température ambiante (30°C). Cependant, les nanofluides de TiO_2 à base d'EG/W (40%: 60%) ont montré une amélioration de la conductivité thermique maximale de 4,38% avec la concentration volumique de 1,0% de nanoparticules de TiO_2. De la même manière, les nanofluides de TiO_2 à base d'EG/W (50%:

50%) ont présenté une amélioration maximale de 14,2% avec une concentration volumique de 1,0% à température ambiante.

[131] ont préparé des nanofluides en dispersant les nanoparticules de CuO dans la proportion de mélange éthylène glycol (EG) - eau. Cette expérience a étudié l'effet de divers facteurs tels que la valeur du pH, le poids des nanoparticules présentes et la température. La conductivité thermique a été mesurée dans la plage de températures de 20 à 95°C. Il a été observé que la conductivité thermique des nanofluides augmentait avec l'augmentation du pourcentage en poids des nanoparticules de CuO. Cependant, après un certain temps, les nanoparticules s'agglomèrent et les nanofluides sont devenus instables. Pour cette raison, la conductivité thermique a diminué avec l'augmentation du pourcentage en poids de nanoparticules de CuO. L'augmentation de la conductivité thermique de 1,66 a été observée à 70°C à la concentration optimale de CuO de 0,060.

[132] ont utilisé de l'éthylène glycol et du glycérol comme fluide de base et préparé les nanofluides en dispersant des nanoparticules de ZnO dans ces fluides de base. Le citrate d'ammonium a été utilisé comme dispersant pour améliorer la dispersion des nanoparticules. La conductivité thermique des nanofluides de ZnO a été mesurée en fonction de la fraction volumique et de la température. On a observé que la conductivité thermique étudiée des nanofluides ZnO/EG et ZnO/glycérol augmentait de manière non linéaire jusqu'à 10,5% et 7,2%, respectivement, avec l'augmentation de la fraction volumique jusqu'à 3% vol.

[133] ont fabriqué et étudié les propriétés thermophysiques des nanofluides à base de diéthylène glycol hautement stables contenant des nanoparticules de Cu pour des applications de transfert de chaleur. La fabrication en une étape a été utilisée, ce qui a abouti à des NF très stables, tandis que le chauffage assisté par micro-ondes a conduit à un système colloïdal homogène en très peu de temps. À une concentration de 1,6% en poids, l'amélioration maximale du Cu NF était d'environ. 7,2%. Il a été conclu que pour tous les NF, les valeurs de l'amélioration de la conductivité thermique étaient plus élevées que le nombre d'augmentation de la viscosité, indiquant leur aptitude en tant que fluide caloporteur.

En outre, [134] ont étudié les caractéristiques de transfert de chaleur d'un nanofluide α-SiC particulier en ce qui concerne l'effet de la concentration de particules α-SiC (3% en poids, 6% en poids et 9% en poids) et différents liquides de base (eau distillée (DW) et eau distillée/mélange éthylène glycol) sur les propriétés thermophysiques des NF. La conductivité thermique (TC) évaluée à 20°C. Le NF avec un liquide de base DW/EG et une concentration de 9% en poids de SiC a montré l'amélioration de la conductivité thermique la plus élevée de 20%.

[135] ont synthétisé des nanoparticules sphériques de ZnO (25 à 40 nm) préparant des nanofluides de ZnO – éthylène glycol (EG) et de ZnO – éthylène glycol – eau. Les nanofluides ZnO – EG et ZnO – EG – eau ont montré une conductivité thermique de 33,4% et une amélioration de 17,26% de la conductivité thermique. Des modèles empiriques ont été développés pour prédire les propriétés de transport des nanofluides.

[136] ont présenté de nouvelles découvertes sur les propriétés thermophysiques comme la conductivité thermique du liquide de refroidissement à base d'Al_2O_3/eau et d'éthylène glycol utilisé dans les radiateurs de voiture. Il a été constaté que la conductivité thermique des nanofluides augmentait avec l'augmentation des concentrations volumiques. À une température plus élevée, la conductivité thermique est intensifiée. Il a été conclu que les nanofluides présentent des performances améliorées à des températures élevées.

[137] ont mesuré expérimentalement la conductivité thermique et la viscosité dynamique des nanofluides Al_2O_3 en faisant varier les concentrations de particules (0,3% à 1,5%), les températures (20–60°C) et les fluides de base (20: 80%, 40: 60% et 60: 40% EG / eau). Les résultats ont indiqué que la conductivité thermique des nanofluides augmente avec l'augmentation des concentrations volumiques et des températures. À une température de 60°C et 1,5%, concentration de particules, l'amélioration de la conductivité thermique pour 20 : 80%, 40 : 60%, 60 : 40% EG / nanofluides d'eau était de 32,26%, 30,51%, 27,42% respectivement par rapport à fluide de base. Les modèles classiques de Hamilton - Crosser et Einstein n'ont pas réussi à prédire la conductivité thermique des nanofluides en fonction des températures, une corrélation a donc été proposée pour calculer la conductivité thermique des nanofluides.

1.3. Autres fluides de base :

[138] ont étudié l'amélioration de la conductivité thermique des nanofluides d'huile pour engrenages CuO et étudié le facteur affectant la conductivité thermique comme la température et la fraction volumique des nanofluides. La conductivité thermique a été mesurée entre la température de 5 et 80°C. L'enquête expérimentale a montré une amélioration de 10,4% de la conductivité thermique des nanofluides avec une fraction volumique de 0,025% de nanoparticules de CuO à température ambiante, et elle augmente à 11,9% à 80°C.

[139] ont étudié expérimentalement la conductivité thermique de nanofluides stables d'huile à base de CuO avec des fractions en poids de particules de 0,2 à 2% à différentes températures. L'enquête expérimentale a sans aucun doute montré que la conductivité thermique augmente avec l'ajout de nanoparticules dans le fluide de base et augmente encore avec l'augmentation de la concentration des particules. L'amélioration maximale de la conductivité thermique de 6,2% a été atteinte avec une fraction de 2% en masse.

[140] ont dispersé les nanoparticules de Cu avec une concentration en volume de 0,11 à 2% dans de l'huile pour engrenages et ont préparé les nanofluides d'huile pour engrenages en Cu avec un surfactant d'acide oléique. Au cours de cette enquête, la conductivité thermique dépendait de la concentration des nanoparticules et de la plage de température entre 10 et 80°C. Dans cette étude, l'amélioration de la conductivité thermique de 24% a été obtenue avec 2% en volume des nanoparticules de Cu à température ambiante.

[141] ont préparé des nanofluides de graphite/huile par méthode de broyage à boulets et étudié la conductivité thermique. Les tests ont montré que les améliorations de la conductivité thermique des nanofluides dépendent fortement de la fraction volumique du graphite et augmentent de manière non linéaire avec des charges croissantes, mais une faible relation

avec la température, l'ajout de seulement 1,36% en volume de graphite dans une huile a entraîné une amélioration de la conductivité thermique élevée de 36%.

[142] ont étudié la conductivité thermique de nanotubes de carbone à parois multiples préparés à l'aide d'un système de dépôt chimique en phase vapeur par plasma micro-ondes utilisant une technique de photo-réflectance thermique pulsée. Ils ont constaté que la conductivité thermique moyenne des films de nanotubes de carbone, avec une épaisseur de film de 10 à 50 µm, est d'environ 15 W/mK à température ambiante et indépendante de la longueur du tube.

[143] ont étudié la conductivité thermique de différents nanotubes de carbone à parois multiples (MWCNT) en utilisant une technique de photo-réflectance thermique pulsée. Un seul MWCNT de diamètre 150 nm avec une longueur de 2 pm a été utilisé. La conductivité thermique intrinsèque du MWCNT individuel à température ambiante s'est avérée être de 2586 W/mK.

[144] ont étudié la conductivité thermique des nanoparticules de Fe_3O_4 dans la paraffine jusqu'à une plage de fractions volumiques de 0,01 à 0,1 de nanoparticules. L'amélioration mesurée de la conductivité thermique était jusqu'à 20% pour les nanofluides de paraffine par rapport au fluide de base ayant 0,1 fraction volumique de Fe3O4nanoparticules à température ambiante.

[145] ont étudié la conductivité thermique du nano réfrigérant Al_2O_3/R141b pour une température de 5 à 20°C. Le résultat expérimental étudié a indiqué que la conductivité thermique augmente avec l'augmentation des concentrations volumiques et des températures. On a observé que la conductivité thermique la plus basse et la plus élevée était de 1,003 fois et 1,013 fois supérieure à celle du fluide de base, pour la température de (5°C et 20°C) et la concentration de particules (0,1 et 0,4% en volume) respectivement.

[146] ont étudié les conductivités thermiques de nanofluides à base de méthanol avec des nanoparticules d'Al_2O_3, SiO_2 et TiO_2 et les ont comparées aux données expérimentales précédentes et aux corrélations existantes. Il a été observé que l'amélioration de la conductivité thermique était d'environ 29,41%, 23,03% et 24,51% par rapport aux fluides de base pour les nanoparticules d'Al_2O_3, SiO_2 et TiO_2 respectivement à une fraction volumique de nanoparticules de 0,15% vol et à une température de 20°C. La valeur de la conductivité thermique pour Al_2O_3 s'est avérée être la plus élevée à la même concentration volumique et à la même température de fonctionnement. Sur la base des données expérimentales, une nouvelle corrélation a été proposée pour la conductivité thermique des nanofluides à base de méthanol en termes de concentration volumique.

[147] ont étudié l'influence de la concentration de particules 1 à 5 vol%) et de la température (300 à 320 K) sur les propriétés thermophysiques du nano-réfrigérant CuO/R134a. La conductivité thermique augmente avec la concentration des particules et la température. Cependant, augmente fortement avec le chargement de particules puis l'élévation de température.

[148] ont étudié les propriétés thermophysiques des nanoparticules de TiO2 en les dispersant dans divers fluides de base tels que 20: 80% et 30: 70% en volume de mélanges Bio-Glycol (BG) / eau (W). Ils ont mené des expériences dans la plage de températures de 30°C et 80°C avec des concentrations volumétriques de 0,5% et 2,0%. On a constaté que la conductivité thermique des nanofluides augmentait avec l'augmentation de la température et des concentrations volumiques. On a observé que l'amélioration de la conductivité thermique maximale était d'environ 12,6% pour 20 : 80% de nanofluides BG: W parmi tous les nanofluides.

[149] ont réalisé des travaux expérimentaux utilisant Cu-Zn 0,1–0,5% et différents types de fluides de base huile végétale, huile de paraffine et huile SAE pour étudier la conductivité thermique et diverses propriétés rhéologiques. Une meilleure stabilité a été observée dans tous les échantillons pendant environ 72 h. Une augmentation de la conductivité thermique a été observée dans les trois fluides de base. Cependant, la conductivité thermique effective de l'huile végétale (0,162 W/mK) est plus élevée que celle de l'huile de paraffine (0,136 W/m K) et de l'huile SAE (0,136 W/m K).

[150] ont mené des expériences pour déterminer la conductivité thermique de cinq types différents de nanofluides à savoir, oxyde d'aluminium, oxyde de cuivre, oxyde de zinc, dioxyde de silicium et nanoparticules de dioxyde de titane dispersées dans un mélange fluide de base de propylène glycol et d'eau dans un rapport 60:40. Dans leurs travaux expérimentaux, ils ont étudié l'effet de la concentration volumétrique des particules dans une plage de température de 30°C à 90°C. Une augmentation de la conductivité thermique des nanofluides a été observée avec l'augmentation de la température, de la concentration et de la température.

[151] ont mesuré la conductivité thermique, les propriétés optiques, vérifié la stabilité des nanofluides SiC en utilisant un fluide à base d'eau saline pour le système de distillation solaire. Les résultats indiquent que les nanofluides de SiC présentent de bons effets pour améliorer la conductivité thermique par rapport aux fluides de base (augmentation> 6% à 0,4% en volume de nanofluides de SiC). Une amélioration d'environ 5,2% a été observée dans la conductivité thermique du nanofluide à base d'eau de mer par rapport au fluide de base.

[152] ont mené une enquête expérimentale pour étudier les propriétés, c'est-à-dire la stabilité et la conductivité thermique des nanofluides TiO_2 à base d'huile diathermique. Les résultats indiquent clairement que la conductivité thermique des nanofluides TiO_2 à base d'huile diathermique augmente avec la fraction volumique. De plus, la conductivité thermique des nanofluides de TiO_2 à chaque plage de concentration s'est avérée supérieure à celle du fluide de base. Cependant, l'amélioration de la conductivité thermique des nanofluides était en corrélation linéaire avec l'augmentation des fractions volumiques des nanoparticules.

2. Autres facteurs influant sur la conductivité thermique des nanofluides :

Un examen approfondi permet de conclure que la conductivité thermique des nanofluides dépend de facteurs tels que la taille, la forme et la nature du matériau de la nanoparticules, le fluide de base ainsi que la température [153, 154].

2.1. La taille des particules :

La taille de la particule est un paramètre important affectant la conductivité thermique des nanofluides. Les nanoparticules peuvent être synthétisées de différentes tailles, allant de 5 à 100 nm. [155] Ont discuté de l'effet de la taille des nanoparticules sur le fluide de base. [108] Ont étudié l'effet de la taille des particules sur le rapport de conductivité thermique des nanofluides alumine (Al_2O_3) / eau. Les résultats de l'expérience ont montré que la conductivité thermique des nanofluides augmente avec la diminution de la taille des particules.

2.2. Forme de particule :

Normalement, deux formes de particules sont utilisées dans la recherche sur les nanofluides; les particules cylindriques et les particules sphériques, respectivement. Les formes cylindriques des nanoparticules ont un grand rapport longueur/diamètre. [156] ont été les premiers chercheurs à étudier les effets de la forme des nanoparticules, que ce soit sphériques ou cylindriques, sur l'augmentation de la conductivité thermique des nanofluides de SiC. [157] ont également étudié l'effet des nanoparticules de forme sphérique et cylindrique sur la conductivité thermique des nanofluides.

2.3. Matériau de la particule et fluide de base :

Les céramiques oxydées, les carbures métalliques, les nitrures, les métaux, les non-métaux sont les différents types de matériaux particulaires utilisés pour la préparation des nanofluides. Les nanotubes de carbone (simple ou multi-paroi) sont également utilisés comme matériau particulaire et ont une conductivité thermique élevée. Les fluides de travail courants tels que l'eau, l'éthylène/propylène-glycols, les bio fluides et l'huile moteur sont utilisés comme fluides de base pour la préparation de nanofluides pour les applications de transfert de chaleur.

2.4. Température :

La conductivité thermique des nanofluides dépend de la température, de la conductivité thermique du fluide de base et des particules. Le mouvement brownien et le regroupement des nanoparticules sont affectées par le changement de température. [123] ont examiné l'amélioration de la conductivité thermique sous sur l'effet de la température pour les nanofluides contenant des nanoparticules de ZnO. La conductivité thermique des nanofluides augmentait avec l'augmentation de la température.

[57] ont étudié expérimentalement la conductivité thermique des nanofluides. Dans cette étude, des nanoparticules de TiO_2 dispersées dans l'eau avec une concentration volumique de 0,2 à 2% en volume sont utilisées. Les résultats ont montré que la conductivité thermique mesurée des nanofluides augmentait avec l'augmentation des températures des nanofluides.

[138] Ont examiné l'amélioration de la conductivité thermique des nanofluides d'huile pour engrenages CuO qui dépend de l'effet de la température. Le résultat a montré que l'amélioration maximale de 10,4% a été obtenue avec 0,025% de fraction volumique de nanoparticules de CuO à température ambiante, et elle augmente jusqu'à 11,9% à une température de 80°C.

[145] ont examiné la conductivité thermique du nano-réfrigérant Al_2O_3/R141b pour différentes plages de température de 5 à 20°C. Le résultat a montré que la conductivité thermique augmente avec l'augmentation des températures. [158] Ont également étudié la conductivité thermique des nanofluides CNT-eau qui dépend de la température. De même, [135] ont montré que l'amélioration de la conductivité thermique la plus élevée était obtenue à la température la plus basse et qu'elle diminuait avec l'augmentation de la température de 10 à 30°C. On a estimé que l'épaisseur de la couche moléculaire d'éthylène glycol augmentait avec la diminution de la température et que cet arrangement ordonné de molécules liquides avait une conductivité thermique plus élevée par rapport au liquide en vrac. En outre, de 30 à 60°C aucune amélioration n'a été constatée. Cela a été postulé que l'augmentation de la conductivité thermique due au mouvement brownien des particules à une température plus élevée est compensée par la baisse de la conductivité thermique due à la réduction de l'épaisseur des couches liquides. [159] Ont également montré une conductivité thermique plus élevée du sable dans le propylène glycol avec 46,2% pour 2 % vol de nanofluides à 10°C.

2.5. Additifs :

Des additifs sont utilisés pour maintenir les nanoparticules en suspension et les empêcher de s'agglomérer. On s'attend donc à ce qu'ils entraînent une amélioration de la conductivité thermique des nanofluides. [160] ont effectué des tests sur le Cu dans l'éthylène glycol avec et sans additifs. Les résultats ont montré que les additifs peuvent augmenter fortement la conductivité thermique effective des nanofluides.

[140] ont préparé les nanofluides d'huile pour engrenages en Cu ayant une concentration en volume de 0,11 à 2% de nanoparticules de Cu avec un tensioactif d'acide oléique. Une amélioration de la conductivité thermique de 24% a été obtenue pour 2% en volume des nanoparticules de Cu à température ambiante. [111] Ont utilisé du dodécylbenzène sulfonâtes de sodium comme surfactant et ont présenté les effets sur la conductivité thermique des nanofluides Cu-H_2O. Les résultats ont indiqué que les améliorations de la conductivité thermique des nanofluides Cu-H_2O étaient extrêmement dépendantes de la concentration de tensioactif SDBS des nano-suspensions.

2.6. Acidité (pH) :

Il n'y a pas beaucoup de recherches sur l'impact du pH du fluide de base sur la conductivité thermique des nanofluides. [156] Ont été les premiers à avoir étudié les résultats croissants de la valeur du pH dans le rapport de conductivité thermique décroissant après avoir fait quelques tests sur les nanofluides Al_2O_3/eau. Les résultats ont montré que l'augmentation de la conductivité thermique des nanofluides Al_2O_3/eau varie de 23% à 19% lorsque le pH passe de 2 à 11,5. De plus, [111] ont présenté l'effet du pH sur la conductivité thermique des nanofluides Cu-H_2O. [107] ont étudié l'effet des valeurs de pH sur la conductivité thermique des nanofluides. Dans cette étude, des nanofluides Al_2O_3–H_2O ont été synthétisés et la conductivité thermique a été étudiée sous différentes valeurs de pH avec de l'eau. Un traitement combinant à la fois le pH et le dispersant chimique est suggéré pour améliorer la conductivité thermique pour l'utilité pratique des nanofluides.

2.7. Clustering :

Le regroupement est un autre paramètre qui peut affecter la conductivité thermique des nanofluides. Lorsque la concentration est élevée et que le temps est assez long, les nanofluides se présentent sous forme d'amas, ce qui réduit la surface efficace de l'interaction thermique des particules provoquant une diminution de la conductivité thermique du fluide. [161] et [162] ont étudié l'effet du clustering sur la conductivité thermique des nanofluides. [163] Ont testé des nanofluides Fe_3O_4/eau et ont trouvé que l'agrégation et l'alignement des nanoparticules étaient grandement responsables de l'augmentation de la conductivité thermique.

La conductivité thermique du nanofluide TiO_2 :

La conductivité thermique des nanofluides a été mesurée en utilisant différents modèles classiques, dont le modèle de [164].

$$K_{eff} = K_{bf}\left[\frac{K_{np} + (n-1)K_{bf} - (n-1)\varphi\left(K_{bf} - K_{np}\right)}{K_{np} + (n-1)K_{bf} + \varphi(K_{bf} - K_{np})}\right] \quad \textbf{Eq 5. 5}$$

où n = 3/ω, où n et ω représentent respectivement le facteur de forme empirique et la sphéricité, φ est la fraction volumique (%) des nanoparticules. Le facteur ω est défini comme le rapport de la surface d'une sphère (égale en volume de la particule donnée) à la surface de la particule. Pour les nanofluides dans lesquels la conductivité thermique des nanoparticules divisée par celle du fluide base est supérieure à 100, l'équation 6.5 ci-dessus doit être utilisée pour la valeur de n = 3/ω. Pour tous les autres valeurs du rapportK_{np}/K_{bf}, n est pris égal à 3. Le modèle HC (Hamilton and Crosser) est un forme améliorée du modèle [165] qui a été utilisé pour prédire la conductivité thermique de solutions bien dispersées de solide-liquide à faible concentration volumique de nanoparticules. Le modèle Maxwell a pris en compte la conductivité thermique et la concentration volumique du fluide de base et des nanoparticules, tandis que le modèle H-C considère également les effets de la forme des particules. L'équation 6.6 représente le modèle de Maxwell utilisé pour calculer la conductivité thermique des nanofluides.

$$K_{eff} = K_{bf}\left[\frac{K_{np} + 2K_{bf} + 2\varphi\left(K_{np} - K_{bf}\right)}{K_{np} + 2K_{bf} + \varphi(K_{np} - K_{bf})}\right] \quad \textbf{Eq 5. 6}$$

Le modèle H-C est utilisé pour les particules cylindriques et sphériques et le modèle Maxwell est utilisé uniquement pour les particules sphériques et pour de faible concentration volumique des nanoparticules.

[166] ont généralisé le modèle de Maxwell en introduisant l'influence de la résistance thermique inter faciale avec la forme, la taille et l'orientation des particules. Le modèle prescrit pour les particules sphériques est exprimé par:

$$K_{eff} = K_{bf}\left[\frac{2K_{bf} + (1+2\alpha)K_{np} + 2\varphi\left[(1-\alpha)K_{np} - K_{bf}\right]}{2K_{bf} + (1+2\alpha)K_{np} - \varphi\left[(1-\alpha)K_{np} - K_{bf}\right]}\right] \qquad \textbf{Eq 5. 7}$$

Dans cette expression, le paramètre adimensionnel α décrit l'interaction particule-fluide et s'exprime comme suit :

$$\alpha = \frac{RK_{bf}}{r_{np}} \qquad \textbf{Eq 5. 8}$$

Où *R* est le coefficient de résistance à la limite thermique, et r_{np} représente le rayon de la nanoparticule dispersée.

La limitation de la fraction volumique des particules peut être évitée en utilisant le modèle de [167]. Ce modèle est utilisé pour un mélange binaire de nanoparticules sphériques homogènes dispersées aléatoirement.

$$K_{eff} = \frac{K_{bf}}{4}\left[(3\varphi - 1)\frac{K_{np}}{K_{bf}} + (2 - 3\varphi) + \frac{K_{bf}}{4}\sqrt{\Delta}\right] \qquad \textbf{Eq 5. 9}$$

$$\Delta = \left[(3\varphi - 1)^2\left(\frac{K_{np}}{K_{bf}}\right) + (2-3\varphi)^2 + 2(2+9\varphi^2)\left(\frac{K_{np}}{K_{bf}}\right)\right] \qquad \textbf{Eq 5. 10}$$

Un modèle H-C rénové à été proposé par [168]; il est une des corrélations les plus couramment utilisé pour les problèmes de transfert de chaleur par convection :

$$K_{eff} = K_{bf}\left[\frac{K_{np} + 2K_{bf} - 2\varphi(K_{bf} - K_{np})}{K_{np} + 2K_{bf} + \varphi(K_{bf} - K_{np})}\right] \qquad \textbf{Eq 5. 11}$$

[169] ont examiné les effets de l'épaisseur de la nanocouche, de la fraction volumique, de la taille des nanoparticules et du rapport de conductivité thermique de la nanoparticule au fluide de base dans le modèle dérivé pour mesurer la conductivité thermique des nanofluides. L'équation 6.12 représente le modèle de conductivité thermique Xie.

$$K_{eff} = 1 + 3\Theta\varphi_T + \frac{3\Theta^2\varphi_T^2}{1 - \Theta\varphi_T}$$

$$\Theta = \frac{\beta_{lf}\left[(1+\gamma)^3 - \beta_{pl}/\beta_{fl}\right]}{(1+\gamma)^3 + 2\beta_{pl}/\beta_{fl}} \quad \therefore \gamma = \frac{\delta}{r_p} \qquad \textbf{Eq 5. 12}$$

$$\beta_{lf} = \frac{K_l - K_f}{K_l + 2K_f} \beta_{pl} = \frac{K_p - K_l}{K_p + 2K_l} \beta_{lf} = \frac{K_f - K_l}{K_f + 2K_l}$$

où δ et rp représentent respectivement l'épaisseur de la nanocouche et le rayon des particules et γ est le rapport entre eux. K_l, K_p *et* K_f, représentent les conductivités thermiques de la nanocouche, nanoparticule et du fluide, respectivement.

Les résultats expérimentaux de différentes études ont montré que la conductivité thermique des nanofluides de TiO_2 augmente en augmentant la concentration volumique des nanoparticules, mais personne n'a clarifié la limite supérieure ou la mesure dans laquelle les nanofluides suivent cette tendance à la hausse [103, 170, 171].

La figure 6-7 montre la variation de la conductivité thermique en fonction de la température. Les barres d'erreur sont utilisées pour présenter les informations concernant l'effet de la concentration de particules sur la conductivité thermique. Les extrémités supérieure et inférieure des barres d'erreur montrent les valeurs maximale et minimale de la conductivité thermique, respectivement, à la concentration de particules la plus élevée et la plus basse utilisées lors des travaux expérimentaux de différents chercheurs.

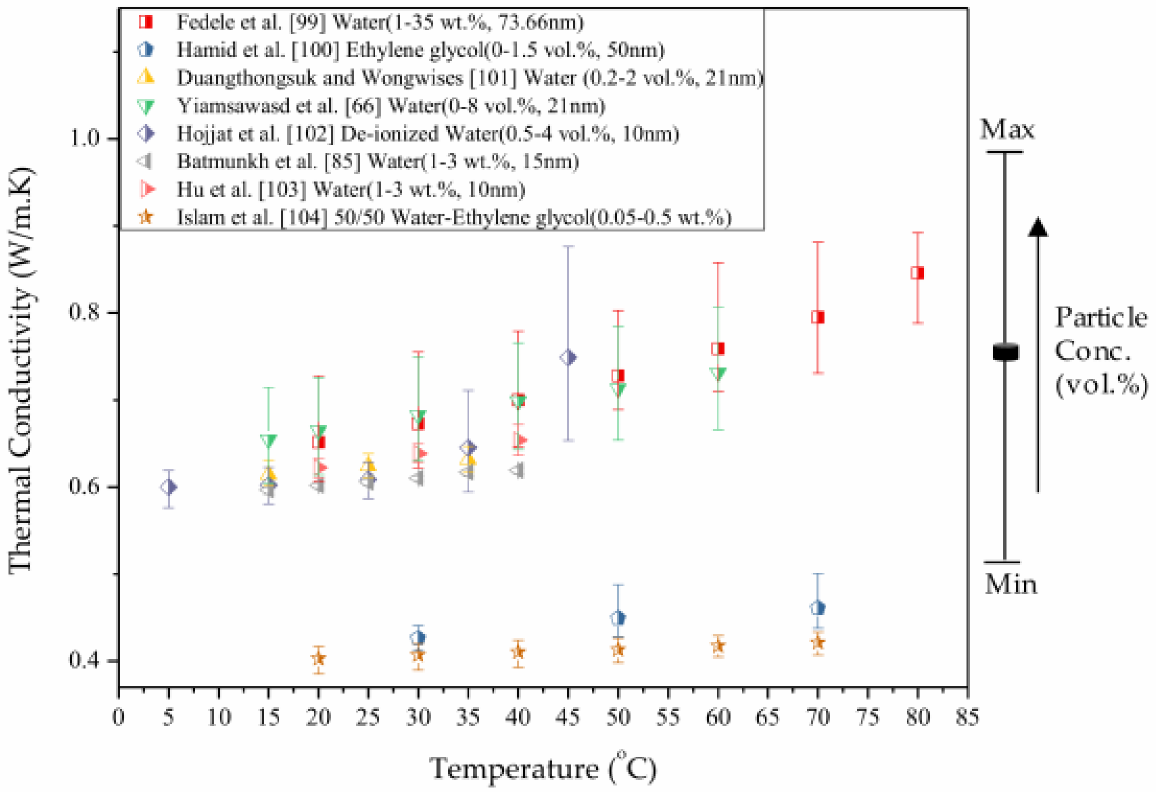


Figure 5- 15:La conductivité thermique du nanofluide de TiO_2 en fonction de la température issue de diverses études.

De toutes les discussions ci-dessus, les déductions suivantes peuvent être tirées:

- La conductivité thermique des nanofluides TiO_2 est directement liée à la température.

• La variation de concentration des particules influence directement la conductivité thermique du nanofluide.
• Les résultats obtenus dans différentes études en utilisant l'eau comme fluide de base ont montré de meilleures performances par rapport à l'éthylène glycol.

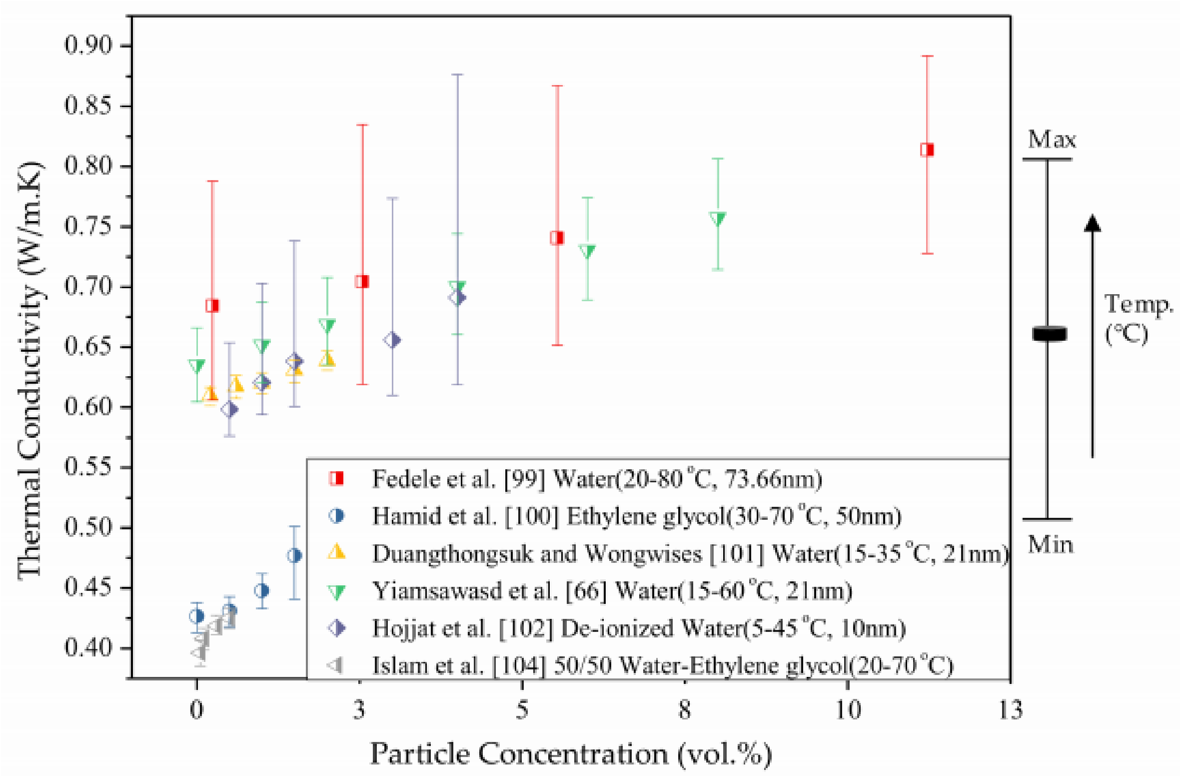


Figure 5- 16:La conductivité thermique de nanofluide TiO_2 en fonction de la concentration de diverses études.

Dans le tableau- 5.4 ci-dessous, nous avons rassemblé un certain nombre de modèles les plus utilisés dans la littérature par les chercheurs pour le calcul de la conductivité thermique effective des nanofluides.

Tableau 5- 2:Déffirents modéles de la conductivité thermique des nanofluides.

Auteurs	Modèles	Validité
Maxwell	$\frac{K_{nf}}{K_{bf}} = \frac{K_{np} + 2K_{bf} - 2\emptyset(K_{bf} - K_{np})}{K_{np} + 2K_{bf} + \emptyset(K_{bf} - K_{np})}$	• Théorique • Sphérique • $\phi_p \leq 1.0$

Xuan	$\frac{K_{nf}}{K_{bf}} = \frac{K_{np} + 2K_{bf} - 2\emptyset(K_{bf} - K_{np})}{K_{np} + 2K_f + \emptyset(K_{bf} - K_{np})} + \frac{\rho_{np}\emptyset C_{p,np}}{2K_{bf}}\sqrt{\frac{2K_b T}{3\pi d_{np}\mu_{bf}}}$	• Théorique • Sphérique et non sphérique • NA
Hamilton-Crosser	$\frac{K_{nf}}{K_{bf}} = \frac{K_p+(n-1)K_{bf}-(n-1)\emptyset(K_{bf}-K_{np})}{K_{np}+(n-1)K_{bf}+\emptyset(K_{bf}-K_{np})}$, $n = 3/\psi$, ψ =facteur de forme $\psi = 1.0$pour les particules sphériques $\psi = 0.5$pour les particules cylindriques	• Théorique • Sphérique • $\phi_p \leq 4.0$
Wasp	$K_{nf} = \left[\frac{K_{np} + 2K_{bf} - 2\emptyset(K_{bf}-K_{np})}{K_{np} + 2K_{bf} + \emptyset(K_{bf}-K_{np})}\right]$	• Théorique • NA • NA
Brueggemann	$K_{nf}/K_{bf} = \left[(3\emptyset - 1)\frac{K_{np}}{K_{bf}} + (3(1-\emptyset) - 1) + \sqrt{\Delta}\right]/4$ $\Delta = \left[(3\emptyset - 1)\frac{K_{np}}{K_{bf}} + (3(1-\emptyset) - 1)\right]^2 + 8\frac{K_{np}}{K_{bf}}$	• Théorique • Sphérique • NA
Yu et Choi	$K_{nf}/K_{bf} = \frac{K_{np} + 2K_{bf} - 2(K_{bf} - K_{np})\emptyset(1+\beta)^3}{K_{np} + 2K_{bf} + (K_{bf} - K_{np})\emptyset(1+\beta)^3}$ β = rapport de l'épaisseur de la monocouche au rayon des nanoparticules = 0,1	• Théorique • Sphérique • NA
Pack et Cho	$K_{nf}/K_{bf} = 1 + 7.47\emptyset$	• Empirique • Sphérique • NA
Lu et Lin	$K_{nf} = (1 + a\emptyset + b\emptyset^2)K_{bf}$	• Théorique • Sphérique et non sphérique

		• NA

Parmi les modèles classiques ci-dessus, l'équation de Xuan a montré une assez bonne concordance avec les données empiriques et est fréquemment utilisée dans de nombreuses recherches. Divers modèles empiriques développés pour la conductivité de différents nanofluides sont conclus dans la référence [172] . Toutes les contraintes, en particulier la taille des particules, le matériau et la concentration, doivent être prises en considération avant d'utiliser ces modèles. Parmi ces corrélations figurent celles proposées par [173] et [174], couvrant un large éventail d'applications:

Modèle de Corcione :

$$K_{nf} = \left[1 + 4.4(Re^{0.4} Pr^{0.66} \left(\frac{T}{T_{fr}}\right)^{10} \left(\frac{K_{np}}{K_{bf}}\right)^{0.03} \emptyset_{np}^{0.66}\right] K_{bf} \; ;$$

$$Re = \frac{2\rho_{bf} K_B T}{\pi \mu_{bf}^2 d_{np}}$$

Meilleure validité pour les nanofluides Al_2O_3, CuO, Cu, TiO_2 à base d'eau et EG,

$10 < d_{np} < 150; \; 0 < \emptyset < 9; \; 20 < T < 50,$

T_{fr} =Point de congélation du fluide de base, $K_B = 1.30866 \times 10^{-23} JK^{-1}$

Modèle de Sharma :

$$K_{nf}/K_{bf} = \left[0.8938\left(1 + \frac{\emptyset}{100}\right)^{1.37} \left(1 + \frac{T_{nf}}{70}\right)^{0.2777} \left(1 + \frac{d_{np}}{150}\right)^{-0.0336} \left(\frac{\alpha_{np}}{\alpha_{bf}}\right)^{0.01737}\right]$$

Meilleure validité pour les nanofluides Al_2O_3, CuO, TiO2, Fe_3O_4, ZrO_2, ZnO et SiC. $20 < d_{np} < 150; \; 0 < \emptyset_{np} < 4; \; 20 < T < 70 \alpha =$ La diffusivité thermique (m^2/s).

5.4.2. Viscosité :

La viscosité est un autre facteur essentiel pour les applications de transfert de chaleur car la chute de pression et la puissance de pompage en dépendent. La viscosité effective dépend de la viscosité du fluide traditionnel utilisé comme fluide de base et de la charge de particules. Parallèlement à cela, le diamètre des particules, la température et le type de nanoparticules affectent également la viscosité effective d'un nanofluide. Par conséquent, des recherches supplémentaires devraient être menées sur la viscosité et les paramètres affectant la viscosité

des nanofluides [80]. Le rhéomètre à piston, le rhéomètre rotatif et le viscosimètre capillaire sont les instruments utilisés pour déterminer la viscosité des nanofluides. Cette section sur la viscosité est axée sur la prise en compte de différents fluides de base.

1. Le Fluide de Base :

1.1. L'eau :

[175] ont étudié l'effet de la température et de la concentration volumique des particules sur la viscosité dynamique des nanofluides eau-Al_2O_3 avec des tailles de particules de 36 et 47 nm. Le résultat a montré que la viscosité dynamique des nanofluides augmentait considérablement avec la fraction volumique des particules de 1% à 9,4%, mais diminuait avec une augmentation de la température de 22°C à 75°C. La viscosité relative a été obtenue pour Al_2O_3 - eau dans les conditions ambiantes et la fraction volumique de particules variant de 0,15% à 13%.

[109] ont étudié expérimentalement la viscosité des nanofluides Al_2O_3/H_2O. Le résultat a indiqué que la viscosité des nanofluides augmente avec la concentration volumique des nanoparticules. Dans cette étude, une augmentation de la viscosité de 2,3 fois a été obtenue par rapport au fluide de base à une concentration volumique de 5%.

[176] ont étudié que la viscosité dynamique effective du nanofluide Al_2O_3-eau. Deux corrélations qui sont celle de Brinkman et de Maiga ont été utilisées pour détermoner la viscosité effective des nanofluides. Après les résultats obtenus à partir de ces deux modèles, le nombre de Richardson, la fraction volumique des nanoparticules et leurs effets ont été étudiés dans le champ d'écoulement à l'intérieur de la cavité. Les effets des incertitudes dans la formule de viscosité des nanofluides dépendent fortement du nombre de Richardson ainsi que de la fraction volumique des nanoparticules.

[177] ont étudié expérimentalement les effets de la température et du temps de cisaillement sur la viscosité d' Al_2O_3 et du CNT avec de l'eau comme fluide de base à faible charge de particules et à basses températures. Les résultats expérimentaux ont révélé qu'à un taux de cisaillement élevé, les nanofluides CNT/eau présentaient un comportement Newtonien, tandis que les nanofluides Al_2O_3/eau présentaient un comportement non Newtonien dans la gamme des basses températures.

[178] ont présenté les résultats d'une mesure de viscosité efficace sur des nanofluides Al_2O_3/eau. Ils ont évalué la viscosité des nanofluides d'eau Al_2O_3 avec des fractions volumiques de particules inférieures à 1% vol et la plage de température de 5 à 20°C. Cette étude expérimentale a montré que la viscosité des nanofluides dans la plage de températures basses et la fraction volumique, est en bon accord avec la plupart des valeurs extrapolées correspondantes.

[104] ont étudié expérimentalement la viscosité dynamique des nanofluides. Dans cette étude, des nanoparticules de TiO_2 dispersées dans de l'eau avec une concentration volumique de 0,2 à 2% en volume ont été utilisées et la plage des températures se situe entre 15 et 35°C. Les résultats ont montré que la viscosité mesurée des nanofluides augmente avec les

concentrations de particules et diminuait avec une élévation de la température des nanofluides.

[179] ont mesuré la viscosité des nanofluides MWCNT. Dans cette étude, ils ont préparé le nanofluide MWCNT/eau en prenant le châtaine comme dispersant, et en utilisant une méthode de synthèse directe. Les nanofluides contenant des MWCNT et du chitosane avec des charges de nanoparticules de 1,5% et 0,4% en poids améliorent de 233% la viscosité par rapport à l'eau désionisée.

[180] ont étudié expérimentalement des nanofluides composés de nanoparticules de ZnO avec une concentration volumique de 0,25 à 2% dispersées dans l'eau. Les résultats ont montré que, dans la gamme de concentrations avec des températures inférieures à 35°C, aucune interaction particule-particule n'a été observée. La viscosité relative était indépendante de la température indépendamment du potentiel zêta. Elle diminue avec l'élévation de la plage de température de 35 à 55°C; ce comportement peut être attribué à l'effet lubrifiant des nanoparticules.

[113] ont étudié la viscosité des nanofluides magnétiques Fe_3O_4/ eau. La méthode de précipitation chimique a été utilisée pour synthétiser les nanoparticules de Fe_3O_4. Les nanofluides sont ainsi préparés en dispersant ces nanoparticules dans de l'eau distillée à l'aide d'un sonicateur. Cette expérience a été menée dans la plage de températures de 20°C à 60°C. La viscosité des nanofluides a augmenté avec une augmentation de la concentration volumique des particules allant de 0,0% à 2,0%. Les résultats ont montré que les nanofluides contenant une concentration volumique de 2,0% de Fe_3O_4 ont une viscosité dynamique 2,96 fois plus importante par rapport à celle du fluide de base.

[181] ont étudié expérimentalement la viscosité dynamique des nanofluides à base d'eau et de nanotubes de carbone. L'influence de la concentration volumique et de la variation de température (0–40°C) a été prise en compte. Les nanofluides ont été préparés par les suspensions de MWCNT dispersées dans de l'eau désionisée et ont été stabilisés à l'aide d'un tensioactif. Le rapport longueur/diamètre des nanotubes variait de près de 160 et la concentration volumique, de 0,0055 à 0,55%. Il a été observé que les nanofluides se comportaient comme des matériaux de cisaillement pour des charges plus élevées, mais à des concentrations plus faibles, les nanofluides se comportaient comme un fluide Newtonien. En outre, la viscosité relative des nanofluides ne variait pas avec la température à un taux de cisaillement élevé.

[119] ont proposé une nouvelle corrélation pour les nanofluides MgO/eau. Dans une autre étude de [120], une corrélation pour le MWCNT fonctionnalisé COOH/eau en fonction de la température et de la concentration a été proposée.

[55] ont étudié la viscosité d' Al_2O_3/eau et TiO_2/eau en fonction de la température et la charge de particules. Il a été observé que la viscosité des nanofluides diminue avec une augmentation de la température, mais le même chemin n'a pas été suivi pendant le refroidissement. Il a montré un effet d'hystérésis.

1.2. Éthylène glycol :

[123] ont examiné la viscosité des nanofluides à base d'éthylène glycol (EG) contenant des nanoparticules de ZnO. Les résultats ont montré que les nanofluides ZnO-EG présentent un comportement Newtonien avec de faibles concentrations volumiques ($\phi \leq 0,02$), et la viscosité diminue considérablement avec l'augmentation de la température. Pour des concentrations volumiques plus élevées ($\phi \geq 0,03$), les nanofluides ont montré des comportements non Newtoniens, car les agrégats pour la fraction volumique effective étaient plus élevés.

[182] ont étudié expérimentalement les propriétés rhéologiques de nanoparticules de CuO en suspension dans un mélange EG 60:40 (en poids) et d'eau. Les expériences ont été réalisées en utilisant des nanofluides avec un pourcentage en volume de particules de 0% à 6,12% et des températures de -35°C à 50°C respectivement. Les résultats ont montré que la viscosité des nanofluides contenant 6,12% de concentration volumique d'oxyde de cuivre était environ quatre fois plus élevée que la valeur du fluide de base à -35°C.

[136] Ont observé une augmentation de la viscosité avec la concentration volumique des nanoparticules pour les nanofluides Al_2O_3/eau et Al_2O_3/eau-EG. Sundar et coll. [84] ont montré les mêmes tendances pour la charge de particules et la température pour Al_2O_3/EG-eau (20 : 80%, 40: 60% et 60: 40%).

[133] ont synthétisé des nanofluides de Cu/d'éthylènes glycol et ont trouvé une augmentation de 5,2% de la viscosité à 1,6% en poids. En outre, dans d'autres recherches, [123] ont étudié le mélange α-SiC/DW et DW et EG. [159] Ont obtenus des nanofluides sable-propylène glycol stables en diffusant des nanoparticules de sable (20-25 nm) produites par broyage de billes d'agitation, dans du propylène glycol. La viscosité des nanofluides de propylène de sable diminue avec une charge de particules de 0 à 2 vol% ainsi qu'avec une augmentation de la température de 29 à 140°C. Il a été observé que dans les nanofluides dispersés, les interactions entre les nanoparticules et le fluide de base (à travers la surface des nanoparticules) provoquaient une perturbation de ces réseaux de liaison hydrogène du propylène glycol. Il conduit apparemment à une réduction de la viscosité des nanofluides par rapport au propylène glycol. La viscosité des nanofluides à 2% en volume était de 46% inférieure à celle du propylène glycol pur à 29°C.

[183] ont également trouvé une diminution de la viscosité avec une charge de particules pour les nanoparticules de ZnO dans le mélange EG et EG-eau.

1.3. Autre Fluide de Base :

[138] Ont mesuré la viscosité des nanofluides CuO/huile pour engrenages. Ils ont étudié l'effet de la concentration volumique de nanoparticules de CuO 0,005–0,025 et des températures (10 et 80°C) sur les nanofluides. Dans cette étude, les résultats ont montré que la viscosité des nanofluides avec une fraction volumique de CuO de 0,025 s'améliore d'environ trois fois par rapport à celle du fluide de base, alors qu'elle diminuait considérablement avec l'augmentation de la température. Un amincissement par cisaillement a été détecté pour les nanofluides contenant une fraction volumique de CuO supérieure à 0,005.

Une autre étude [140] ont travaillé sur les nanofluides d'huile à engrenages en cuivre. Ils ont préparé les nanofluides d'huile pour engrenages en Cu ayant une concentration en volume de nanoparticules de Cu de 0,11 à 2% avec un tensioactif d'acide oléique. Les résultats expérimentaux ont pris en compte l'influence de la fraction volumique des particules et de la température comprise entre 10 et 80°C. Dans cette étude, l'amélioration de la viscosité d'environ 71% a été obtenue pour 2% en volume de nanoparticules de Cu dans l'huile pour engrenages à 30°C. [139] Ont étudié la viscosité de nanofluides à base d'huile et de CuO. Cette expérience a été réalisée avec différentes fractions en poids de particules de 0,2 à 2% à différentes températures. Les résultats expérimentaux ont manifestement montré que la viscosité dynamique augmente significativement avec l'augmentation de la concentration en nanoparticules. Un incrément plus élevé a été observé aux températures plus basses des nanofluides.

[184] Ont étudié la viscosité de nouveaux nanofluides d'oxyde de cuivre et d'huile de coco. Des expériences ont été réalisées pour mesurer la viscosité à différentes températures et différentes concentrations allant de 0% à 2,5%. L'amincissement par cisaillement, une performance non Newtonienne a été obtenue pour tous les échantillons. L'amincissement par cisaillement a été obtenu comme étant plus élevé à des taux de cisaillement inférieurs et à des concentrations plus élevées.

[144] ont étudié la viscosité des nanoparticules de Fe_3O_4 dans la paraffine dans une plage de fractions volumiques de 0,01 à 0,1 de nanoparticules. Le nanofluide a été préparé en dispersant des nanoparticules de Fe_3O_4 dans de la paraffine en utilisant un équipement à ultrasons. Les résultats expérimentaux ont montré que la viscosité augmente avec l'augmentation de la fraction volumique des particules et qu'elle est bien inférieure à celle calculée par le modèle d'Einstein. Le nanofluide de paraffine Fe_3O_4 montrait un comportement non Newtonien dans la plage de taux de cisaillement faible et n'est Newtonien que pour un taux de cisaillement élevé.

[145] ont examiné la viscosité du nano réfrigérant Al_2O_3/R141b pour des concentrations de 0,1 à 0,4 vol à différentes températures allant de 5°C à 20°C. Le résultat a montré que la viscosité augmente linéairement avec l'augmentation des fractions volumiques, mais diminue avec l'augmentation de la température.

[185] ont préparé des nanofluides de graphène-glycérol et mesuré expérimentalement les propriétés rhéologiques des nanofluides. Les résultats ont montré que la viscosité des nanofluides de graphène-glycérol dépend de la fraction massique et de la température. Il augmente avec l'augmentation de la fraction massique et diminue avec l'augmentation de la température. Dans cette étude, une amélioration de 401,49% de la viscosité du glycérol a été obtenue par chargement de 2% de nanofeuilles de graphène à un taux de cisaillement de 6,32 s-1 et 20°C.

[147] ont observé une augmentation de la viscosité avec le chargement des particules et une diminution avec la température pour le nanofluide CuO/R134a. [113] Ont trouvé un rapport

de viscosité maximal de 2,96 fois celui de l'eau à une concentration volumique de 2,0% du nanofluide Fe_3O_4 /eau.

2. Effets de divers facteurs sur la viscosité des nanofluides :

La viscosité des nanofluides dépend de nombreux facteurs tels que la concentration volumique, la taille des particules, la morphologie, le taux de cisaillement et la température [113, 123, 175, 178].

2.1. Concentration Volumique :

La concentration volumique des nanofluides est le facteur le plus important des fluides de refroidissement, qui affecte directement la viscosité des nanofluides. De nombreux chercheurs ont montré que la viscosité des nanofluides augmente avec l'augmentation des concentrations de particules [182, 186-188]; [113]; [189]. Ce constat a été obtenu aussi par [179]; [184]; [182]; [139]; [157] ;[159, 183].

2.2. Morphologie :

La morphologie des nanoparticules, à la fois la forme et la taille, peut influencer la viscosité et la puissance de pompage du système de refroidissement. [175] a considéré deux tailles de particules différentes, 36 et 47 nm d'Al_2O_3 et a montré que le nanofluide Al_2O_3 avec 47 nm a une viscosité supérieure à celle avec des nanoparticules de 36 nm.

2.3. Taux de cisaillement :

Le taux de cisaillement est un autre paramètre qui peut influencer la viscosité des nanofluides non newtoniens. [181] Ont étudié expérimentalement la viscosité des nanofluides de nanotubes de carbone à base d'eau. Les résultats ont montré que les nanofluides se comportaient comme des matériaux fluidifiants par cisaillement à des charges de particules élevées. Pour une teneur en particules plus faible, les nanofluides se comportaient comme des fluides Newtoniens. [123] Ont examiné l'effet du taux de cisaillement sur la viscosité des nanofluides à base d'EG contenant des nanoparticules de ZnO. Les résultats ont observé que les nanofluides ZnO-EG à faibles concentrations volumiques ($\phi \leq 0,02$) présentent des comportements newtoniens. Pour des concentrations volumiques plus élevées ($\phi \geq 0.03$) nanofluides ZnO-EG, présente les comportements non newtoniens.

2.4. Température :

La température est l'un des paramètres les plus importants affectant la viscosité. [175] Ont étudié l'effet de la température sur la viscosité dynamique du nanofluide eau-Al_2O_3 avec des tailles de particules de 36 et 47 nm. Le résultat a révélé que la viscosité dynamique des nanofluides augmente de manière significative avec la fraction volumique des particules, mais diminue clairement avec une élévation de température. [178] Ont mesuré la viscosité du nanofluide Al_2O_3 –eau à des températures allant de 5 à 20°C et des fractions volumiques de nanoparticules inférieures à 1% vol. Les résultats indiquent que la viscosité du nanofluide Al_2O_3-eau présente une bonne concordance dans cette plage de basse température et de fraction volumique avec le modèle d’Einstein. [180] Ont étudié expérimentalement des nanofluides composés de nanoparticules de ZnO dispersées dans l'eau. Les résultats ont montré que la viscosité relative diminue avec l'augmentation de la température (35–55°C).

[190] Ont étudié la conductivité thermique et la viscosité de l'eau désionisée au TiO_2 pour une température de 13 à 55°C et les résultats ont prouvé une réduction de la viscosité avec la température.

La viscosité dynamique du nanofluide TiO_2 et les équations de prédiction :

[191] A développé le premier modèle pour mesurer la viscosité des nanofluides en 1906. La forme sphérique des nanoparticules et la faible fraction volumique (ϕ <0,02%) étaient les facteurs qui limitaient le modèle d'Einstein. De plus, le modèle discuté ne tenait pas compte de la structure et de l'interaction particule à particule dans la solution.

$$\mu_{nf} = (1 + 2.5\varphi)\mu_{bf} \qquad \textbf{Eq 5. 13}$$

Dans cette équation, μ_{nf} et μ_{bf} sont les viscosités dynamiques du nanofluide et du fluide de base, respectivement. [192] A étendit les travaux d'Einstein en réduisant dans une certaine mesure les limites de la concentration volumique des nanoparticules. Le modèle développé de Brinkman était plus précis et acceptable pour les fractions volumiques inférieures à 4%. L'équation 6.14 représente la formule empirique du modèle de Brinkman.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_{bf}}{(1-\varphi)^{2.5}} \qquad \textbf{Eq 5. 14}$$

φest la fraction volumique des nanoparticules (%). Le modèle de [193] a examiné l'effet du mouvement brownien des nanoparticules sphériques et a introduit le nouveau modèle en modifiant l'équation d'Einstein. La corrélation de ce modèle développé s'exprime comme suit :

$$\mu_{nf} = (1 + 2.5\varphi + 6.2\varphi^2)\mu_{bf} \qquad \textbf{Eq 5. 15}$$

[194] a proposé son modèle de loi de puissance en 1970 qui était considéré comme plus approprié pour les nanoparticules à plus de 2% en fraction volumique. L'équation 5.16 désigne le modèle de Nelson.

$$\mu_{nf} = \left[(1 + 1.5\varphi)e^{\frac{\varphi p}{(1-\varphi m)}}\right]\mu_{bf} \qquad \textbf{Eq 5. 16}$$

Où ϕ_m et ϕ_p représentent respectivement la fraction volumique maximale et la concentration volumique des nanoparticules.

Les modèles ci-dessus étaient obsolètes et n'ont pas réussi à montrer un accord raisonnable avec les résultats expérimentaux pour des concentrations plus élevées de nanoparticules (au-dessus de 1% vol.) [104, 171, 195], car ces modèles considèrent la viscosité du nanofluide en fonction de la concentration des particules et de la viscosité du fluide de base uniquement, et n'ont pas tenu compte de l'effet de la température, qui a un lien étroit avec la viscosité

effective du nanofluide [88, 195-198]. Cependant, l'effet de la température sur la viscosité du TiO_2 est contradictoire selon certains rapports [199, 200].

Les figures 5-9 et 5-10 montrent la variation de viscosité en fonction de la température et de la concentration volumique des particules [88, 104, 170, 190, 195, 198, 201-204], respectivement. Sur la figure 5-9, les barres d'erreur représentent les valeurs supérieure et inférieure de viscosité avec concentration de particules à la température spécifique, tandis que sur la figure 5-10, les extrémités des barres ont montré les valeurs maximale et minimale de viscosité avec température à la valeur spécifique de concentration de particules, pour l'étude particulière.

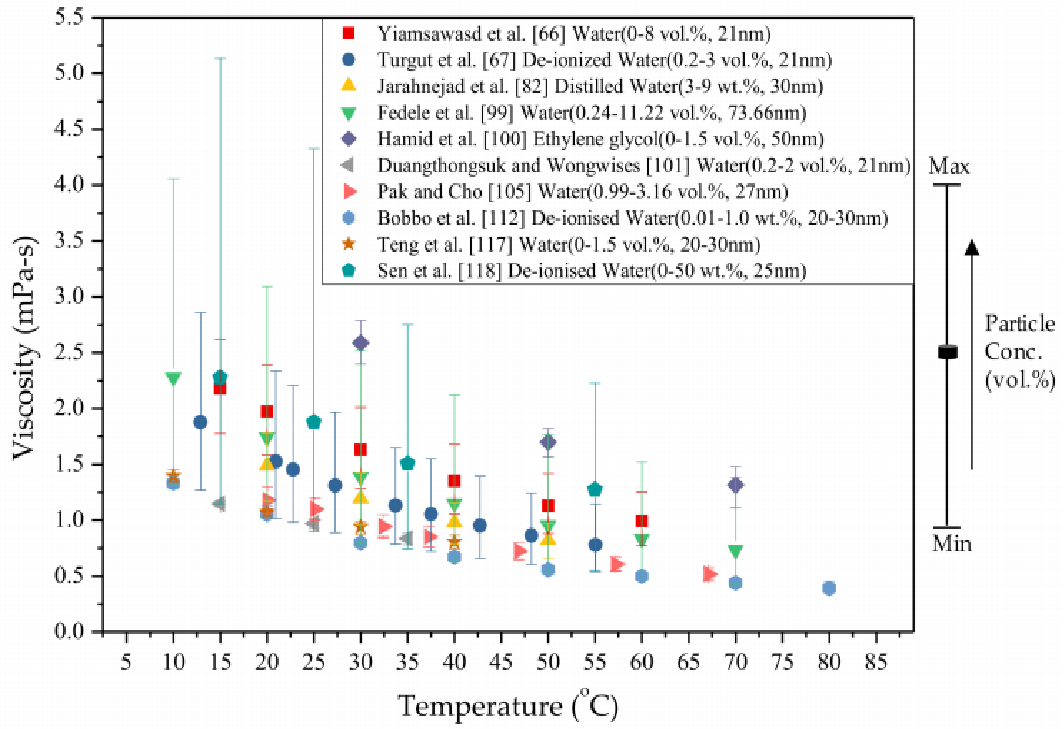


Figure 5- 17:Viscosité du nanofluide TiO_2 en fonction de la température pour diverses études.

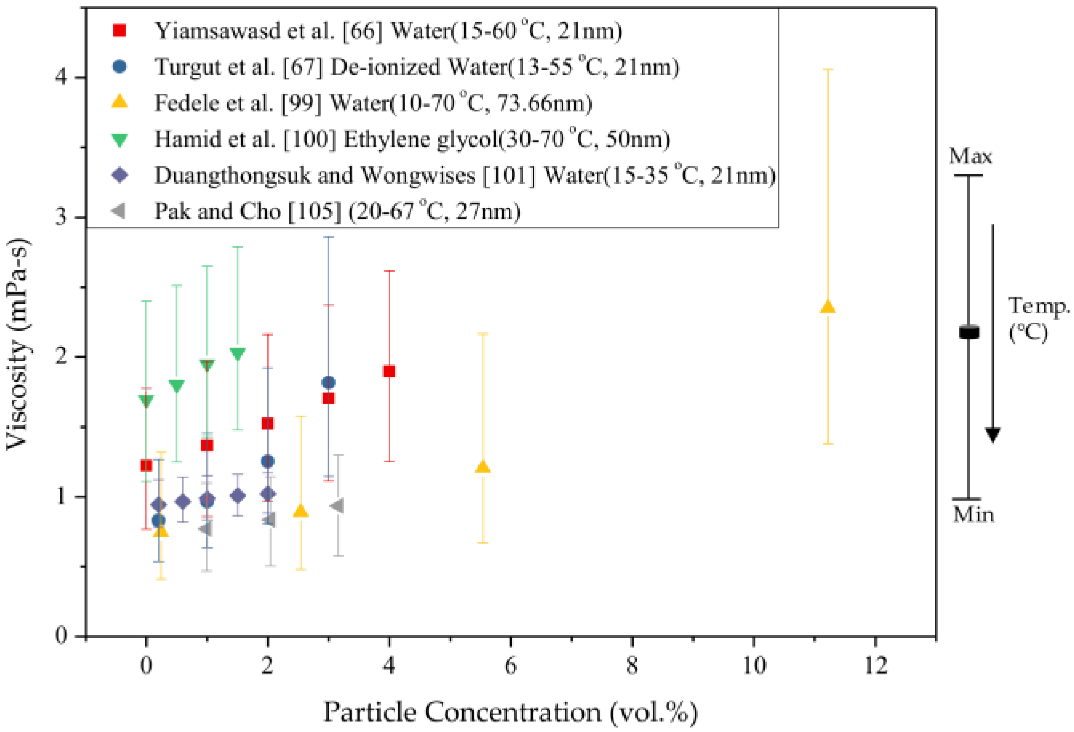


Figure 5- 18:Viscosité du nanofluide TiO_2 en fonction de la concentration (vol%) des nanoparticules pour diverses études.

Les études sur la viscosité dynamique confirment les points suivants concernant la variation de viscosité :

• La viscosité des nanofluides est inversement proportionnelle à la température.
• La viscosité dynamique augmente avec l'augmentation de la concentration des nanoparticules dans le nanofluide.

Dans le tableau- 5.3 ci-dessous, nous avons rassemblé un certain nombre de modèles les plus utilisés dans la littérature par les chercheurs pour le calcul de la viscosité dynamique effective des nanofluides.

Tableau 5- 3: Modèles existants de viscosité des nanofluides [172].

Auteurs	Modèles	Validité
Einstein	$\mu_{nf} = (1 + 2.5\emptyset)\mu_{bf}$	• Sphérique • $\varphi_p \leq 2.0$
Brinkman	$\mu_{nf} = \left[\frac{1}{(1-\emptyset)^{2.5}}\right]\mu_{bf}$	• Sphérique • $\varphi_p \leq 5.0$
Batchelor	$\mu_{nf} = (1 + 2.5\emptyset + 6.2\emptyset^2)\mu_{bf}$	• Sphérique • NA
Graham	$\mu_{nf} = (1 + 2.5\emptyset + 4.5)\left[\frac{1}{(\delta/d_p)(2+\delta/d_p)(2+\delta/d_p)^2}\right]\mu_{bf}$	• Sphérique • NA

	δ = espace entre les particules = $\sqrt[3]{\frac{\pi}{6\emptyset}}\,d_p$	
Kreiger–Dougherty	$\mu_{nf} = \left[\left(1-\frac{\emptyset_p}{\emptyset_{p.max}}\right)^{-[\eta]\emptyset_{p.max}}\right]\mu_{bf}$ $\eta = 2.5$pour les particules sphériques $\emptyset_{p.max}$ = maximum fraction volumique $= 0.605(0.001 \leq \emptyset_p \leq 0.05$ $-[\eta]\emptyset_{p.max} = -1.5125$	• Sphérique et non sphérique • 0.001≤ φ_p ≤ 0.05
Nielson	$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1+1.5\emptyset)e^{\left(\frac{\emptyset}{1-\emptyset_m}\right)}$	• Sphérique • $\varphi_p \geq 2.0$

Semblable à la conductivité thermique, de nombreuses équations empiriques ont été développées pour décrire le comportement de la viscosité des nanofluides. La plupart des équations ne sont valides que pour une certaine gamme de tailles de particules et de concentrations. Les modèles ci-dessous proposés par [173] et [174], sont valables pour une large gamme de paramètres:

Modèle de Corcione :

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \left[\frac{1}{1-34.87\left(d_{np}/d_{bf}\right)^{-0.3}\emptyset^{1.03}}\right],\ d_{bf} = \left(\frac{6M}{N\pi\rho_{f0}}\right)^{1/3}$$

M =Le poids moléculaire du fluide de base (Kg mol^{-1}), N = le nombre d'Avogadro

ρ_{f0} =La masse volumique du fluide de base calculée à température $T_0 = 293\ K$

Modèle de Sharma :

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = C_1\left(1+\frac{\emptyset}{100}\right)^{11.3}\left(1+\frac{T_{nf}}{70}\right)^{-0.038}\left(1+\frac{d_{np}}{170}\right)^{-0.061}$$

où les valeurs du coefficient C_1 dans le modèle de Sharma sont de 1,4 pour le nanofluide SiC et de 1,0 pour les autres nanofluides.

5.4.3. Chaleur spécifique :

La chaleur spécifique est une des propriétés thermophysiques qui joue un rôle important. Il existe deux modèles qui ont été utilisés pour le calcul de la chaleur spécifique des nanofluides. Le premier modèle est basé sur la concentration volumique des nanoparticules et il a été présenté par [205], en considérant le principe du mélange liquide-particules.

$$C_{pnf} = \emptyset(C_p)_p + (1-\emptyset)(C_p)_{bf} \qquad \textbf{Eq 5. 17}$$

Avec C_{pp} et C_{pbf}, sont les chaleurs spécifiques des nanoparticules et du fluide de base, respectivement. Le deuxième modèle est basé sur le mécanisme d'équilibre thermique et il a été proposé par [206].

$$C_{pnf} = \frac{(1-\emptyset)\left(\rho C_p\right)_{bf} + \emptyset\left(\rho C_p\right)_p}{(1-\emptyset)\rho_{bf} + \emptyset\rho_p} \qquad \textbf{Eq 5. 18}$$

[207] ont examiné l'effet de la taille des nanoparticules et de la température sur la capacité thermique spécifique du nanofluide. [208] ont étudié la chaleur spécifique de composites contenant des nanotubes de carbone orientés à paroi unique et à parois multiples, de la poudre de graphite et un nanotube de carbone à parois multiples aligné noyé dans une matrice d'aluminium poreuse dans la gemme des température 300 à 400 K. Les résultats ont indiqué que la chaleur spécifique des MWCNT et des SWCNT ont des valeurs similaires que la poudre de graphite en vrac. [209] Ont utilisé la technique de calorimétrie à balayage différentiel de température modulée (MTDSC) pour la détermination de la chaleur spécifique. Les résultats ont montré que la présence de nanoparticules de cuivre dans le fluide de base modifie les caractéristiques des processus de cristallisation et de fusion et réduit les valeurs des chaleurs spécifiques des nanofluides dans toute la plage de température étudiée. [139] Ont étudié expérimentalement les capacités calorifiques spécifiques des nanofluides huile/CuO avec des fractions massiques de particules de 0,2 à 2% à différentes températures. Dans cette expérience, les nanofluides ont montré une capacité thermique plus faible que celle du fluide de base, de plus, et elle diminue avec l'augmentation de la concentration des nanoparticules. Le résultat a indiqué que la chaleur spécifique des nanofluides avec une fraction de 2% en poids était d'environ 23% inférieure à celle du fluide de base à 40°C. [210] ont mesuré la capacité thermique spécifique de nanofluide à base de sel fondu à haute température. Quatre nanoparticules de dioxyde de silicium de tailles différentes (5, 10, 30 et 60 nm de diamètre) ont été dispersées dans un eutectique à sel fondu pour obtenir des fluides de fonctionnement à haute température. Un calorimètre à balayage différentiel a été utilisé pour mesurer la capacité thermique spécifique des nanofluides. Le résultat obtenu montre que la capacité thermique spécifique des nanofluides augmente de 25% par rapport à celle du fluide de base, et cela quelle que soit la taille des nanoparticules incorporées.

5.4.4. Densité :

La densité est une propriété thermophysique importante afin d'évaluer les performances de transfert de chaleur des nanofluides. La valeur de la densité affecte directement le nombre de Reynolds, le facteur de frottement, la perte de charge et le nombre de Nusselt. Très peu de chercheurs ont étudié cette propriété des nanofluides. [205] Ont utilisé l'équation des particules micrométriques et l'ont utilisé pour les particules nanométriques afin de pouvoir calculer la viscosité ; elle est exprimée comme :

$$\rho_{nf} = \varphi\rho_p + (1-\varphi)\rho_f \qquad \textbf{Eq 5. 19}$$

Les expériences ont été menées avec des nanofluides (Al_2O_3 et TiO_2) à une température fixe de 25°C et la concentration volumique variait jusqu'à 4,5%. [211] ont étudié

expérimentalement trois nanofluides différents avec des dispersions de différentes concentrations (0,5% à 7% en fraction pondérale) de nanoparticules d'Al_2O_3 dans un fluide de base (eau). Ils ont mesuré la densité pour trois températures (283.15, 298.15 et 313.15 K). Il a été observé que l'effet global de la taille s'est avéré faible, quoique la densité augmente avec la concentration de nanoparticules. [212] ont étudié expérimentalement la densité de l'alumine (Al_2O_3), de l'antimoine-oxyde d'étain (Sb_2O_5 : SnO_2) et de l'oxyde de zinc (ZnO). L'accent était mis sur la détermination précise de la densité des nanofluides ci-dessus. Les valeurs mesurées de (Al_2O_3, Sb_2O_5 : SnO_2) ont montré un excellent accord avec l'Equation 6-13 pour les nanofluides. Cependant, le nanofluide de ZnO a montré une variation de 8% avec l'équation, et augmentait encore avec la charge des particules. Ils ont donc proposé un facteur de correction pour le nanofluide. [213] Ont mené les expériences en utilisant TiO_2, Al_2O_3, SiO_2 et $TiSiO_4$ à différentes concentrations et températures. Ils ont comparé les résultats avec le modèle théorique donné par [214] et ont trouvé que les résultats étaient incompatibles pour la variation de température. [215] Ont étudié l'effet de l'ajout de nanotubes de carbone à parois multiples (MWCNT) dans un mélange eau-éthylène glycol sur la densité en utilisant la méthode du ballon et comparé à l'équation. Ils ont observé que la densité du nanofluide augmentait proportionnellement à la concentration volumique de MWCNT par rapport à celle du fluide de base. Les données mesurées ont montré un bon accord avec les données prédites en utilisant l'équation 6-19 pour de faibles concentrations du MWCNT. Cependant, les résultats de l'Equation 6-19 ont surestimé la densité des nanofluides avec 1,5% en poids. [216] Ont mesuré expérimentalement la densité du nanofluide CuO/eau. Ils ont trouvé que la densité augmentait avec la concentration, mais diminuait avec la température. [217] ont mesuré la densité du nanofluide d'alumine (Al_2O_3)/eau nanofluide. Les résultats montrent que l'écart de la valeur mesurée avec l'équation 0,25–2,53%.

La revue de la littérature montre que les études expérimentales sur la densité des nanofluides sont très peu nombreuses. Par conséquent, il est nécessaire de poursuivre les travaux de recherche nécessaires pour établir les conditions dans lesquelles l'équation de la théorie du mélange donne les meilleurs résultats.

PUISSANCE DE POMPAGE

La viscosité du nanofluide augmente avec l'ajout des nanoparticules dans le fluide de base, ceci entraine un effet de pompage plus élevé que pour le fluide de base pour faire circuler le nanofluide dans le système [218]. La puissance de pompage est fonction de la chaleur transférée et de la concentration volumique des particules. De plus, le facteur de frottement affecte la perte de charge et le calcul de la perte de charge est proportionnel à la puissance de pompage.

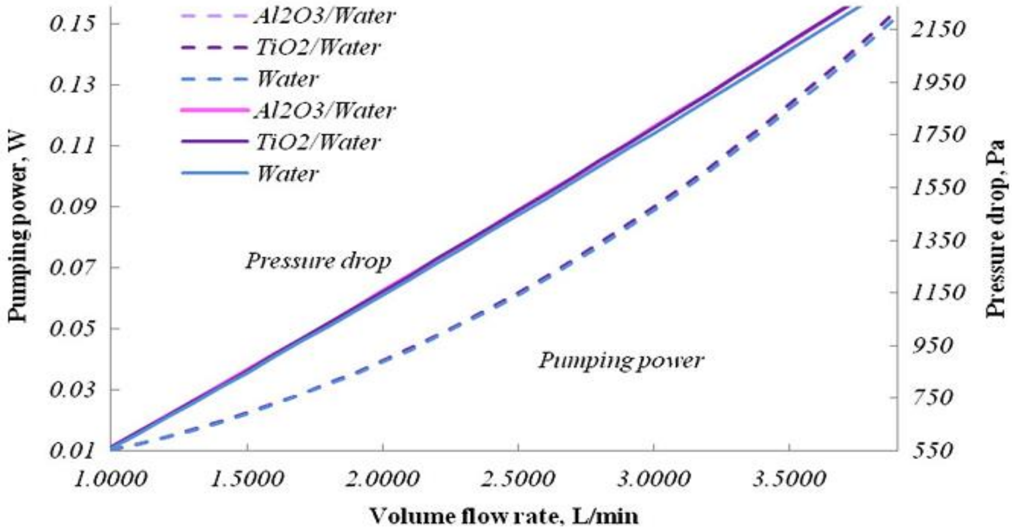


Figure 5- 19:Effet du débit volumique sur la puissance de pompage et la perte de charge pour les nanofluides Al_2O_3-eau et TiO_2-eau.

I. L'AGGLOMÉRATION

L'agglomération est l'un des problèmes potentiels, qui génère un effet négatif sur l'amélioration de la conductivité thermique. Au fur et à mesure que la taille des particules augmente, la vitesse d'agglomération augmente, conduisant à la formation d'agrégats, ce qui entraîne une faible amélioration de la conductivité thermique et une sédimentation des particules. Pour la réduction de l'agglomération des particules, des facteurs tels qu'une faible concentration en volume et de petites tailles de particules doivent être pris en compte pour les nanofluides.

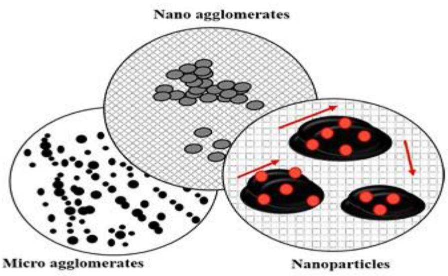


Figure 5- 20:La formation de nanoparticules, micro et nanocluster et leur comportement dans différentes conditions et leur phénomène derrière le transport thermique à l'échelle nanométrique.

Conclusion : L'incertitudes des valeurs de λ_{nf} et μ_{nf} sur les résultats des calculs des performances énergétiques des (PV/T) :

[219] grâce à une évaluation complète des propriétés thermophysiques de différents nanofluides, ont découvert que la majorité des données expérimentales concernant la conductivité thermique ainsi que la viscosité dynamique mesurée par différents auteurs, présentent dans leur majorité des désaccords; ce qui fait que des études de réévaluation pour sélectionner celles présentant les incertitudes les plus faibles comme cela a été fait pour les fluides ordinaires par [219] est plus que nécessaire.

Par ailleurs, la plupart des modèles utilisés pour déterminer la conductivité thermique effective des nanofluides sont basés sur la conductivité thermique de la nanoparticule (λp); cette dernière propriété thermophysiques est actuellement très difficile à mesurer et est très différente de son homologue en vrac (bulk) [220, 221]. Ce fait conduit par conséquent à une grande incertitude quant à la valeur de la conductivité thermique utilisée dans les simulations. Ainsi, de nombreux résultats issues des simulations numériques sur les nanofluides sont donc discutables (Vanaki et al., 2016).

Dans les simulations numériques, il faudra plutôt utiliser comme données d'entrées dans la mesure du possible, des mesures expérimentales des propriétés thermophysiques (λ_{nf}, μ_{nf} et Cp_{nf}) du nanofluide. La propriété thermophysique la plus importante est certainement la conductivité thermique effective λ_{nf}, qui, d'après les mesures effectuées par différents auteurs, augmente linéairement avec la valeur de la fraction volumique[222]. La viscosité dynamique est également importante; son accroissement avec la fraction volumique est non linéaire en raison du comportement non newtonien du nanofluide [196]. En plus de ces deux propriétés, la chaleur spécifique joue également un rôle important dans le processus de transfert de chaleur; ainsi, les variations des trois propriétés thermophysiques avec la température, la pression, la fraction volumique, les dimensions et les formes géométriques des nanoparticules, auront un impact direct sur les performances énergétiques du système utilisant un nanofluide [223].

CHAPITRE VI

MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU CAPTEUR HYBRIDE (PV/T) À BASE DE NANOFLUIDE EAU-TiO_2

Préambule :

Comme expliqué en détail dans le chapitre V précédent, l'utilisation des nanofuides dans les systèmes énergétiques a certes dans presque la quasi majorité des études, donnée lieu à des améliorations des performances énergétiques de ces systèmes. Cependant, il existe aussi des études qui sont en contradiction avec ce qui est généralement admis sur les nanofluides. Ce chapitre VI sera consacré au début, à la détermination des propriétés thermophysiques du nanofluide eau–TiO_2, tout particulièrement la conductivité thermique effective et la viscosité dynamique effective. Ces deux données seront utilisées comme valeurs d'entrées dans les simulations. Dans ce chapitre VI, on présentera aussi les équations gouvernantes et les conditions aux limites correspondantes au cas d'étude d'un collecteur hybride PVT à base d'un nanofluide eau–TiO_2 circulant dans un canal de section droite rectangulaire placé au-dessous du PV. Cette configuration est donc similaire à celle de Nahar *et al.*, Il faudra cependant insister sur un fait; qu'au meilleur de mes connaissances, il n'existe pas une configuration similaire d'un PVT à base d'un nanofluide

6.1 Détermination des propriétés thermophysiques du nanofluide TiO_2– eau utilisé dans le présent travail :

6.1.1 La conductivité thermique :

De complexité variable, les modèles classiques les plus simples pour la conductivité thermique effective des nanofluides prennent en compte les influences de la concentration des nanoparticules, la conductivité thermique des particules et du fluide de base ainsi que la forme des particules [106, 166, 167]. D'autres plus complexes, considèrent le mouvement brownien, l'agrégation des nanoparticules, la couche inter-faciale entre particules et liquide [224]. La plupart de ces paramètres sont très difficiles à déterminer, et en tant que tels, il n'existe actuellement aucun modèle général de prédiction de la conductivité thermique pour tous les nanofluides.

Parmi les objectifs de cette thèse, comprendre quels sont les paramètres physiques et les techniques à utiliser pour obtenir une solution nanofluidique stable et homogène pendant la plus longue période possible. Cette étude est très importante ou des applications réelles et effectives des collecteurs hybrides (PVT) à base de nanofluides. En conclusion de ce qui a été remarqué, il faudra envisager des solutions avec des fractions volumiques inférieures à 1,5%, et utiliser des microscopes SEM ou TEM pour sélectionner des poudres de TiO_2 de diamètres moyens de l'ordre ou inférieurs à 30 nm (nanomètre). Le tableau 6-1 présente un résumé et quelques observations sur les mesures expérimentales de conductivité thermique de TiO_2-eau réalisées par [104],[225] et [226], respectivement.

Tableau 6- 1 : Résumé de certaines recherches expérimentales sur la conductivité thermique du nanofluide TiO_2-eau.

Auteurs	**Taille de Particule (nm)**	**Forme de Particule**	**Pourcentage volumique (%)**	**Intervalle de Temp. (°C)**	**Surfactant**	**Tech de mesure**	**Tech de vision**	**Observations**
[104]	21	Sphère	0.2-2	15-35	NA	File chaud	MET	1) λ_{nf}/λ_w augmentent avec ϕ_v. 2) λ_{nf}/λ_w diminue légèrement avec l'augmentation de la température.
[225]	20	Sphère	0.25-2	22	NA	File chaud	MEB	1) pH of 11 is used to prevent agglomeration. 2) λ_{nf}/λ_w augmente avec ϕ_v et diminue avec la taille de la particule.
[226]	27	Sphère	1-4.3	32-67	NA	File chaud	MEB	1) la variation de λ_{nf}/λ_w avec ϕ_v est presque linaire. 2) le pH 10 est utilisé pour disperser les nanoparticules

Les conductivités thermiques efficaces du nanofluide TiO_2-eau utilisées dans nos simulations sont calculées à partir d'une régression linéaire en combinant les données expérimentales des groupes de recherche cités dans le tableau 6.1. Sur la figure 6-1, nous remarquons que la corrélation donnée par l'équation 6-1 ci-dessous, évaluera le rapport de la conductivité thermique effective du nanofluide à celle de l'eau (λ_{nf} /λ_{bf}) dans une plage de ± 3%.

$$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{bf}} = C_1 + C_\emptyset \cdot \emptyset_v(\%) + C_T \cdot \left[\frac{T(K)}{353K}\right] \qquad \textbf{Eq 6. 1}$$

Avec C_1, = 1.18121, C_ϕ = 0.02346 et C_T = –0.19365.

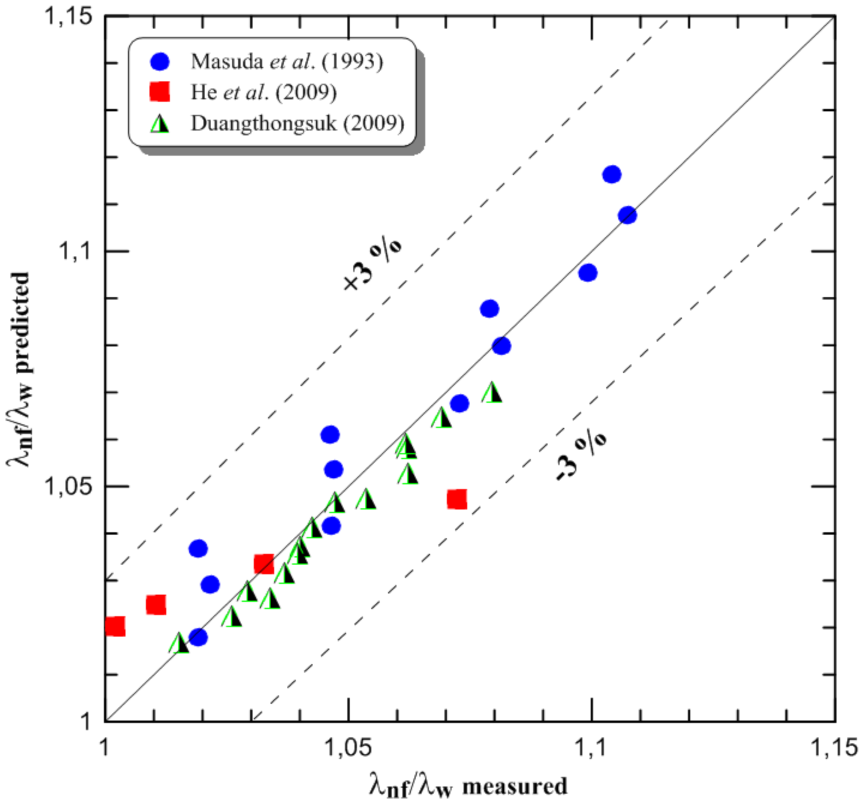


Figure 6- 1:*Rapport des conductivités thermiques pour le nanofluide eau-TiO_2 ($\lambda_{nf}/\lambda_{bf}$) prédit par l'Eq. 6.1 en fonction du rapport ($\lambda_{nf}/\lambda_{bf}$) mesuré.*

6.1.2 La viscosité dynamique :

Des mesures antérieures de viscosité dynamique du nanofluide eau-TiO_2 montrent toutes qu'elle est fonction à la fois de la concentration des nanoparticules et de la température. Avec l'augmentation de la température, la viscosité du nanofluide diminue, cependant, elle augmente avec l'augmentation de la concentration des nanoparticules [227].

Les observations montrent que la plupart des modèles développés jusqu'à présent, ne permettent pas de prédire la viscosité pour tous les nanofluides. Dans un article de synthèse, [228] les auteurs ont constaté que les valeurs de la viscosité calculées à partir des équations disponibles dans la littérature, dévient presque toutes comparativement à celles mesurées, notamment en ce qui concerne la valeur pratique dans une large gamme de fraction volumique.

Par conséquent, pour obtenir une prédiction assez précise, et suivant la même approche que celle proposée pour la conductivité thermique, il est préférable de développer une corrélation pour la viscosité dynamique du nanofluide avec l'effet de la fraction volumique et

des températures en se basant sur ses propres données expérimentales si c'est possible, ou bien sur des valeurs mesurées et sélectionnées parmis plusieurs chercheurs. Comme les échantillons proviennent des mêmes chercheurs ayant mesuré la conductivité thermique, le tableau 6.2 ne donne que quelques observations sur les mesures expérimentales de la viscosité dynamique de TiO_2-eau faites par [104],[225] et [226], respectivement.

Tableau 6- 2:Résumé de certaines recherches expérimentales sur la viscosité dynamique du nanofluide TiO_2-eau.

Auteurs	**Mesures Tech.**	**Observations**
[104]	Rhéomètre rotatif Bohlin	Pour une valeur fixe de la température, les auteurs proposent une corrélation de la forme $\mu_{nf} / \mu_w = a + b\phi + c\phi^2$
[225]	NA	Pour une valeur fixe de la température, les auteurs proposent une corrélation de la forme $\mu_{nf} / \mu_w = a + b\phi + c\phi^2$
[226]	NA	Pour une valeur de température fixe, les auteurs trouvent que μ_{nf} augmente linéairement avec la fraction volumique des particules

Les viscosités dynamiques effectives du nanofluide TiO_2-eau utilisé dans nos simulations sont calculées à partir d'une régression linéaire (Eq. 6.2) en combinant les données expérimentales des groupes de recherche cités dans le tableau 6-2. Le rapport μ_{nf} / μ_w est estimé dans une plage de ± 8%.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = C_1 + C_\emptyset \cdot \emptyset_v(\%) + C_T \cdot \left[\frac{T(K)}{353K}\right] \qquad \textbf{Eq 6. 2}$$

avec C_1, = 0.375, C_ϕ = 0.1292 et C_T = –0.7298

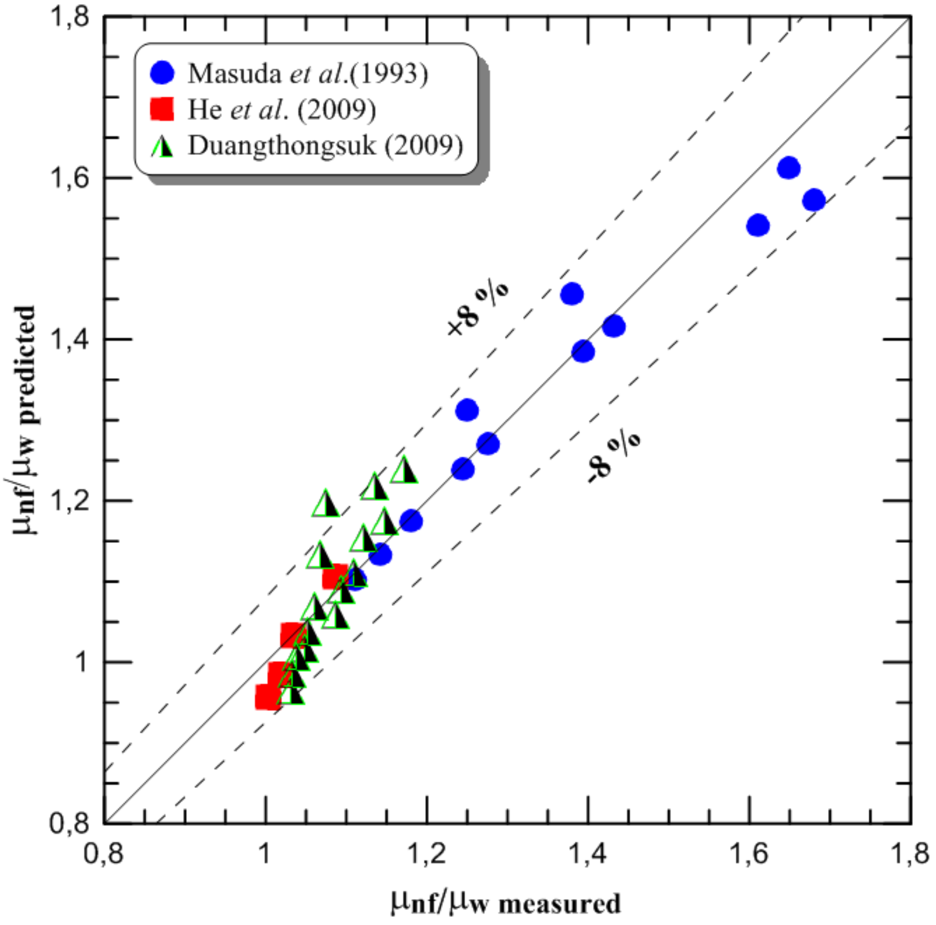


Figure 6- 2 :*Rapport des viscosités dynamiques pour le nanofluide eau-*TiO_2 *(*μ_{nf}/μ_{bf}*) prédit par l'Eq. 6.2 en fonction du rapport (*μ_{nf}/μ_{bf}*) mesuré.*

6.1.3 Densité et chaleur spécifique :

La densité et la capacité calorifique du nanofluide sont calculées à l'aide des équations. 6.3 et 6.4, respectivement :

$$\rho_{nf} = \emptyset \cdot \rho_{np} + (1 - \emptyset_v) \cdot \rho_{nbf} \qquad \textbf{Eq 6. 3}$$

$$C_{p,nf} = \frac{\emptyset_v(\rho_{np} \cdot C_{p,np}) + (1 - \emptyset_v)(\rho_{bf} \cdot C_{p,bf})}{\rho_{nf}} \qquad \textbf{Eq 6. 4}$$

où l'indice np fait référence aux nanoparticules. Le tableau 6-3 ci-dessous donne les propriétés thermophysiques des nanoparticules de TiO_2 ainsi que celles de l'eau.

Tableau 6- 3 : Les propriétés thermophysiques de l'eau et des nanoparticules TiO_2*[229]* .

Matériau	Densité (kg/m^3)	Chaleur spécifique (J/kg.K)
TiO_2	4250	686
Eau	997.1	4179

6.2 Etude Numérique :

Comme mentionné en introduction, nous adoptons dans ce travail la géométrie et la configuration du collecteur hybride (PV/T) proposé par [44]. Ils ont expérimenté et simulé le (PV/T) avec COMSOL Multiphysics; dans notre cas, en revanche, nous utilisons ANSYS FLUENT® 16.2.

Dans la présente étude, la première loi de la thermodynamique (énergie) et deuxième loi (exergie) seront prises en compte dans l'évaluation des performances du collecteur hybride (PVT) à base d'eau et de nanofluide TiO_2-eau.

Sur la figure 6.3, la vue en coupe transversale du capteur solaire à plaques plates (PV/T) proposé par [44] est donnée. La longueur du collecteur est *L* et sa largeur est *W*. La hauteur du canal rectangulaire de refroidissement est *H*.

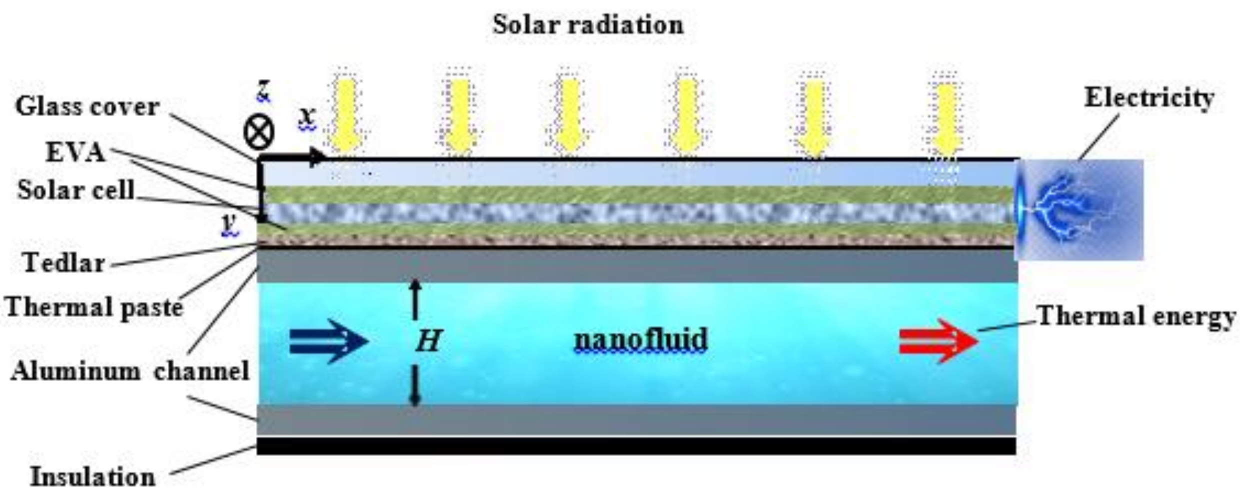


Figure 6- 3 :Vue en coupe de PV/T hybride proposé par [44].

Le modèle de transfert de chaleur en trois dimensions (3D) a été développé et résolu pour prédire numériquement les performances thermiques et électriques des capteurs hybrides.

6.2.1 Hypothèses :

Les hypothèses suivantes sont supposées valides :

(a) Étant donné qu'aucune variation du rayonnement solaire, de la température ambiante et la vitesse du vent sur une courte période (10 min environ) peut être remarquée, les conditions quasi-stationnaires sont supposées valides. Ainsi, dans chaque simulation, le rayonnement solaire, la température ambiante, et la vitesse du vent sont considérés comme des constantes.

(b) Le fluide (eau ou nanofluide) est incompressible.

(c) L'écoulement est stable et laminaire totalement développé (établi).

(d) Les propriétés thermiques du fluide sont isotropes et dépendent de la température. Pour le cas des nanofluides, la conductivité thermique effective, la viscosité dynamique, la densité et la capacité calorifique sont calculés en utilisant les équations. 6.1, 6.2, 6.3 et 6.4, respectivement.

(e) La surface du couvercle en verre du PV est propre (pas de poussière); Par conséquent, l'absorptivité de l'énergie solaire n'est pas affectée.

(f) La transmissivité de l'acétate d'éthyle vinyle (EVA) est prise égale à 100 %.

(g) L'isolation thermique est utilisée sur la face inférieure du panneau photovoltaïque (adiabatique).

(h) Les résistances thermiques d'interface entre les matériaux solides sont négligeables.

6.2.2 Equations Gouvernantes :

L'équation de la continuité est :

$$\partial u/\partial x + \partial v/\partial y + \partial w/\partial z = 0 \qquad \textbf{Eq 6. 5}$$

Les équations régissant l'écoulement du fluide ou équations de Naviers-Stokes pour l'écoulement du fluide à l'intérieur du canal rectangulaire sont :

Dans la direction *x* :

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_{bf}}\frac{\partial P}{\partial x} + \upsilon_{bf}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \qquad \textbf{Eq 6. 6}$$

Dans la direction y est :

$$u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}=-\frac{1}{\rho_{bf}}\frac{\partial P}{\partial y}+\upsilon_{bf}\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right)$$ **Eq 6. 7**

Dans la direction *z* est :

$$u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}=-\frac{1}{\rho_{bf}}\frac{\partial P}{\partial z}+\upsilon_{bf}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right)$$ **Eq 6. 8**

L'équation de l'énergie est :

$$\rho_{bf}C_{p,bf}\cdot\left(u\cdot\frac{\partial T(x,y,z)}{\partial x}+v\frac{\partial T(x,y,z)}{\partial y}+w\frac{\partial T(x,y,z)}{\partial z}\right)=k_{bf}\left[\frac{\partial^2 T(x,y,z)}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T(x,y,z)}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T(x,y,z)}{\partial z^2}\right]$$ **Eq 6. 9**

υ_f, ρ_{bf}, $C_{p,bf}$ et k_{bf} sont les propriétés thermophysiques du fluide (viscosité cinématique, densité, chaleur spécifique et conductivité thermique, respectivement). *u*, *v* et *w* étant les composantes de vitesse dans les directions *x*, *y* et *z*, respectivement.

Dans tous les domaines solides du collecteur (PV/T), la conduction est considérée comme le mécanisme de transfert de chaleur à travers les différentes couches, et les résistances d'interface sont supposées négligeables. L'équation de conduction thermique est:

$$\nabla\cdot\left(k\nabla T\right)=0$$ **Eq 6. 10**

6.2.3 Condition aux limites :

- **Dans le domaine fluide :**

$$x=0,\delta_m\le y\le\delta_m+H,0\le z\le W\Rightarrow T(0,y,z)=T_{in},u=U_0,v=w=0$$ **Eq 6. 11**

où δ_m étant l'épaisseur totale de tous les matériaux solides du verre supérieur jusqu'au fluide.

La condition de non-glissement est appliquée à l'interface fluide-parois :

$$u=v=w=0$$ **Eq 6. 12**

- **À la sortie ($x = L$), la pression est égale à la pression atmosphérique :**

$$P=P_0$$ **Eq 6. 13**

- **Sur la face supérieure (interface verre-air) :** $\left(x\ge 0, y=0, z\ge 0\right)$

A la surface du verre de couverture, non seulement les pertes de chaleur par rayonnement et la convection sont prises en compte, mais aussi la réflectivité au niveau de la surface du verre ($\rho_g \cdot G_T$) et la transmissivité ($\tau_g \cdot G_T$). Le bilan thermique au niveau de la surface est :

$$x \geq 0, y = 0, z \geq 0 \Rightarrow$$
$$\left(1 - \tau_g - \rho_g\right)G_T = h_{g-air}\left(T_g - T_{amb}\right) + \varepsilon_g \sigma_{SB}\left(T_g^4 - T_{sky}^4\right) \quad \textbf{Eq 6. 14}$$

ε_g et σ_{SB} sont respectivement l'émissivité de la surface du verre et la constante de Stefan-Boltzmann.

- **Aux interfaces entre le fluide et les surfaces supérieure et inférieure du réservoir en verre :**

($x \geq 0, y = \delta_m \ \ and \ \ y = H + \delta_m, z \geq 0$), t

Pour refroidir uniformément toute la surface du panneau PV, les dimensions réelles du réservoir (canal) sont choisis égales à celles du panneau photovoltaïque. L'écoulement laminaire totalement établi du nanofluide est donc approximé comme étant équivalent à celui entre deux plaques planes parallèles soumises à deux flux de chaleur fixes mais différents; où celui du bas est pris égal à zéro (adiabatique). Selon [230], le nombre de Nusselt pour la surface supérieure du réservoir peut être calculé comme suit:

$$Nu_{y=\delta_m} = \frac{140}{26} \approx 5.384 \quad \textbf{Eq 6. 15}$$

Le coefficient de transfert de chaleur par convection est donc égal à :

$$h = \frac{Nu_{Dh} \cdot \lambda_f}{D_h} = \frac{5.384 \cdot \lambda_{bf}}{2H} \quad \textbf{Eq 6. 16}$$

Dans ANSYS FLUENT®, le coefficient *h* sera utilisé dans un cas spécial comme conditions aux limites de type convection.

- **La condition aux limites adiabatique est considérée au fond du réservoir et sur les parois latérales** (i.e. $z = 0$ et $z = W$) du (PV/T) (une isolation thermique est utilisée);

$$-n \cdot \left(-k \ \nabla T\right) = 0 \quad \textbf{Eq 6. 17}$$

Pour le calcul de T_{sky}, nous utilisons l'équation suivante [231]

$$T_{sky} = 0.0552 \cdot T_{amb}^{1.5} \quad \textbf{Eq 6. 18}$$

Le coefficient de convection $h_{g\text{-}air}$ est calculé à l'aide de l'équation [232]

$$h_{g-air} = 5.67 + 3 \cdot 86 \cdot V_{air} \quad \textbf{Eq 6. 19}$$

6.3 La méthode de solution numérique :

Le code CFD du logiciel basé sur la méthode des volumes finis. Le logiciel ANSYS FLUENT® est utilisé pour résoudre les équations gouvernantes (c'est-à-dire la masse, la quantité de mouvement et l'énergie) en tenant compte des conditions aux limites respectives discutées dans les sections précédentes. La simulation 3D s'est déroulée dans des conditions stationnaires. Les données sur la température moyenne de surface de la cellule, la température moyenne de sortie de l'eau sont extraites de ces calculs et ont été utilisées pour déterminer différents paramètres du système (PV/T), par exemple, ,η_{th}, η_{pv}, η_{pvt} , ε_{pv}, ε_{th}, et ε_{pvt}.. Ces symboles grecs η et ε se réfèrent respectivement à l'efficacité énergétique et exergétique. Dans le chapitre 7, des détails sur la détermination de l'efficacité globale de l'hybride (PV/T) seront donnés.

Le maillage :

Le collecteur hybride (PV/T) (voir figure 6-3) est maillé dans ANSYS FLUENT®16.2 en utilisant le paramètre de séquence de maillage contrôlé par la physique intégrée illustré sur la figure 6.4 ci-dessous. Les critères de convergence sont définis de telle sorte que les erreurs résiduelles pour les équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie se réduisent à moins de 10^{-6}. La plus grande précision des calculs est obtenue avec 247120 éléments de maillage.

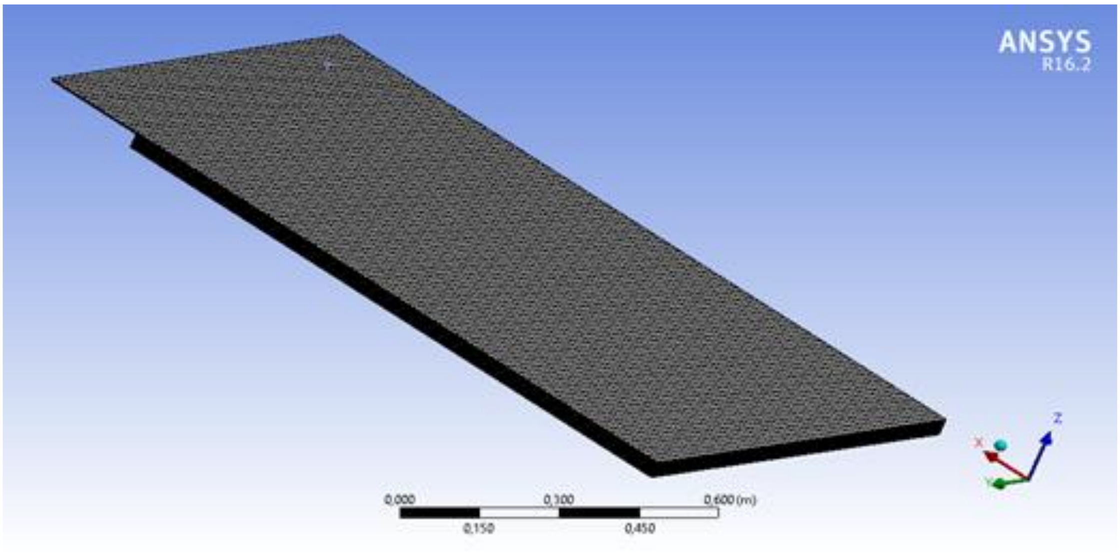


Figure 6- 4:Collecteur (PV/T) maillé pas ANSYS FLUENT®.

6.4 Évaluation des performances énergétiques et exergétiques:

Puisque le collecteur hybride (PV/T) délivre deux formes d'énergies différentes (respectivement thermique et électrique), l'évaluation des performances globales considère simultanément la première et deuxième lois de la thermodynamique, ou en d'autres termes, l'analyse énergétique et exergétique, respectivement [25].

6.4.1 Analyse Energétique :

La première loi considère la performance globale du (PV/T) (η_{pvt}) comme le rapport de l'énergie de sortie (PV/T) au rayonnement solaire incident sur la surface extérieure du collecteur (PV/T). L'énergie de sortie est la somme de l'énergie et thermique absorbée par le fluide de refroidissement et électrique fournie par le PV, respectivement.

La puissance thermique extraite par le fluide caloporteur est donnée par :

$$\dot{E}_{th}(W) = \dot{m}_{bf} C_{p,bf} (T_{out} - T_{in}) \quad \textbf{Eq 6. 20}$$

$\dot{m}_{bf}$ (kg/s) étant le débit massique de fluide ; il est calculé à l'aide de l'équation suivante:

$$\dot{m}_{bf} = \rho_{bf} U_0 S_{ch} \quad \textbf{Eq 6. 21}$$

Le nombre de Reynolds est calculé comme suit :

$$\mathrm{Re} = \frac{U_0 D_h}{\nu_f} \quad \textbf{Eq 6. 22}$$

D_h est le diamètre hydraulique et est donné par :

$$D_h = \frac{4S_{ch}}{P_{ch}} \quad \textbf{Eq 6. 23}$$

La puissance de sortie thermique par unité de surface E''_{th} (W/m^2) est donnée par l'équation suivante :

$$E''_{th} = \frac{\dot{E}_{th}}{A_{pv}} = \frac{\dot{m}_{bf} C_{p,bf} (T_{out} - T_{in})}{A_{pv}} \quad \textbf{Eq 6. 24}$$

La quantité d'énergie solaire efficace qui atteint réellement le PV est inférieure à G_T, car nous devons également prendre en compte la transmissivité du verre τ_g et l'absorptivité de la cellule PV α_c, nous obtenons :

$$G_{Teff} = G_T \cdot (\tau_g . \alpha_c) \qquad \textbf{Eq 6. 25}$$

Le rendement thermique η_{th} est calculé comme suit :

$$\eta_{th} = \frac{E''_{th}}{G_T} = \frac{\dot{m}_f C_{p,bf}(T_{out} - T_{in})}{A_{pv} \cdot G_T} \qquad \textbf{Eq 6. 26}$$

L'efficacité électrique de la cellule PV peut également être exprimée comme [44, 233] :

$$\eta_{pv} = \eta_{ref}\left[1 - \beta_{ref}(T_c - T_{ref})\right] \qquad \textbf{Eq 6. 27}$$

L'efficacité énergétique globale du (PV/T) est la somme de l'efficacité thermique et électrique, nous avons :

$$\eta_{pvt} = \eta_{th} + \eta_{pv} \qquad \textbf{Eq 6. 28}$$

La puissance électrique de sortie $\dot{E}_{pv}$ (W) est donnée comme suit :

$$\dot{E}_{pv} = \eta_{pv} \cdot A_{pv} \cdot G_T \cdot \qquad \textbf{Eq 6. 29}$$

6.4.2 Analyse exergétique :

Dans le présent travail, et pour simplifier le texte, nous reprenons l'essence de l'analyse exergétique, tandis que les détails se trouvent dans des références spécialisées telles que [234]. L'exergie est définie comme le travail obtenu par transformation d'énergie. On observe que sur la base de la deuxième loi de la thermodynamique, l'énergie électrique est égale à son exergie. En revanche, l'énergie thermique n'est transformée en travail qu'à travers un cycle de Carnot. L'exergie obtenue est donc égale à l'énergie thermique multipliée par un facteur inférieur à 1, qui est $\left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{out}}\right)$. L'énergie d'entrée (W) à l'ensemble du système qui est le (PV/T) est l'énergie électromagnétique du soleil, nous avons

$$\dot{E}_{sun} = A_{pv} \cdot G_T \qquad \textbf{Eq 6. 30}$$

Les exergies de sorties sont liées aux énergies de sorties comme suit [40] :

$$\dot{E}x_{pv} = \dot{E}_{pv} \qquad \textbf{Eq 6. 31}$$

$$\dot{E}x_{th} = \dot{m}_{bf} \cdot C_{p,bf}(T_{bf,out} - T_{f,in}) \cdot \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{bf,out}}\right) \qquad \textbf{Eq 6. 32}$$

L'exergie de l'irradiation solaire est calculée par l'équation de [43], on a:

$$\dot{E}x_{sun} = \dot{E}_{sun}\left[1-\frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right] = A_{pv}\cdot G_T\left[1-\frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right] \qquad \textbf{Eq 6. 33}$$

T_{sun}étant la température de surface du soleil, qui est approximativement égale à 5770 K.

L'efficacité exergétique de la conversion PV ε_{pv} est :

$$\varepsilon_{pv} = \frac{\dot{E}x_{pv}}{\dot{E}x_{sun}} = \frac{\eta_{pv}}{\left[1-\frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right]} \qquad \textbf{Eq 6. 34}$$

L'efficacité exergétique de la conversion photo-thermique ε_{th} est :

$$\varepsilon_{th} = \frac{\dot{E}x_{th}}{\dot{E}x_{sun}} = \frac{\dot{m}_f\cdot C_{p,bf}\left(T_{bf,out}-T_{bf,in}\right)\cdot\left(1-\frac{T_{amb}}{T_{bf,out}}\right)}{A_{pv}\cdot G_T\left(1-\frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right)} = \eta_{th}\cdot\frac{\left(1-\frac{T_{amb}}{T_{bf,out}}\right)}{\left(1-\frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right)} \qquad \textbf{Eq 6. 35}$$

Le rendement exergétique global ε_{pvt} du collecteur hybride (PV/T) est donc:

$$\varepsilon_{pvt} = \varepsilon_{pv} + \varepsilon_{th} = \frac{\left[\eta_{pv} + \eta_{th}\cdot\left(1-\frac{T_{amb}}{T_{bf,out}}\right)\right]}{\left(1-\frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right)} \qquad \textbf{Eq 6. 36}$$

Du point de vue du transfert de chaleur, le bilan exergétique appliqué au volume de contrôle correspondant au collecteur hybride (PV/T) est donné par :

$$\dot{E}x_{sun} + \dot{E}x_{mass,in} = \dot{E}x_{pv} + \dot{E}x_{mass,out} + \dot{E}x_{loss,Q} \qquad \textbf{Eq 6. 37}$$

Par conséquent, nous obtenons l'expression suivante pour la perte d'exergie due au transfert de chaleur [40]

$$\dot{E}x_{loss,Q} = \dot{E}x_{sun} + \dot{E}x_{mass,in} - \dot{E}x_{pv} - \dot{E}x_{mass,out} \qquad \textbf{Eq 6. 38}$$

L'équation pour calculer la variation d'exergie pour le débit massique est [233]:

$$\dot{E}x_{mass,in} - \dot{E}x_{mass,out} = \dot{m}_{bf}\cdot\left[\left(h_{bf,in}-h_{bf,out}\right) + T_{amb}\cdot\left(s_{bf,in}-s_{bf,out}\right)\right] \qquad \textbf{Eq 6. 39}$$

h et *s* désignent respectivement l'enthalpie et l'entropie du fluide. Le changement d'entropie Δs du flux de fluide est défini comme :

$$\Delta s = s_{out} - s_{in} = C_{p,bf} \cdot \ln\left(\frac{T_{bf,out}}{T_{bf,in}}\right) \qquad \textbf{Eq 6. 40}$$

En ajoutant la variation de l'enthalpie de débit du fluide est :

$$\Delta h = h_{out} - h_{in} = C_{p,bf} \cdot \left(T_{bf,out} - T_{bf,in}\right) \qquad \textbf{Eq 6. 41}$$

Remplaçons les équations. (7.40) et (7.41) dans l'équation (7.39), on obtient:

$$\dot{E}x_{mass,in} - \dot{E}x_{mass,out} = -\dot{m}_{bf} \cdot C_{p,bf} \cdot \left[\left(T_{bf,out} - T_{bf,in}\right) + T_{amb} \cdot \ln\left(\frac{T_{bf,out}}{T_{bf,in}}\right)\right] \qquad \textbf{Eq 6. 42}$$

En substituant l'exergie du soleil et l'électricité du (PV) qui sont données par les équations (6.30) et (6.31) respectivement, avec l'équation (6.42) dans l'équation (6.38), nous obtenons l'expression finale de la perte d'exergie due au transfert de chaleur ;

$$\dot{E}x_{loss,Q} = A_{pv} \cdot G_T \left[1 - \frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right] - \eta_{pv} \cdot A_{pv} \cdot G_T - \dot{m}_{bf} \cdot C_{p,bf} \cdot \left[\left(T_{bf,out} - T_{bf,in}\right) + T_{amb} \cdot \ln\left(\frac{T_{bf,out}}{T_{bf,in}}\right)\right] \qquad \textbf{Eq 6. 43}$$

$$\dot{E}x_{loss,Q} = A_{pv} \cdot G_T \left(\left[1 - \frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right] - \eta_{pv}\right) - \dot{m}_f \cdot C_{p,f} \cdot \left[\left(T_{f,out} - T_{f,in}\right) + T_{amb} \cdot \ln\left(\frac{T_{f,out}}{T_{f,in}}\right)\right] \qquad \textbf{Eq 6. 44}$$

L'autre perte d'exergie dans le système (PV/T) est due au frottement du fluide ; c'est le résultat de la chute de pression entre les sections d'entrée et de sortie. Elle est calculée comme [233]

$$\dot{E}x_{loss,fr} = \frac{\dot{m}_{bf} \cdot T_{amb} \cdot \ln\left(\frac{T_{bf,out}}{T_{bf,in}}\right)}{\rho_{bf} \cdot \left(T_{bf,out} - T_{bf,in}\right)} \cdot \Delta P \qquad \textbf{Eq 6. 45}$$

où ΔP est la perte de charge dans le canal de refroidissement rectangulaire. Nous écrivons l'équation de perte de charge pour un écoulement laminaire horizontal sous la forme [227]

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \frac{\rho_{bf} \cdot U_0^{\,2}}{2} \qquad \textbf{Eq 6. 46}$$

L est la longueur du canal; D_h le diamètre hydraulique donné par l'Equation 6.23 et *f* est appelé facteur de friction (frottement). Pour l'écoulement laminaire entièrement développé dans un canal rectangulaire, *f* a été calculé par [230] et les résultats sont présentés comme *f*·Re par rapport au facteur de forme du canal (*H*/*W*). Après avoir numérisé la figure (Fig.19, page 118 du rapport de la référence (Shah & London, 1971), on obtient une corrélation (avec un coefficient de corrélation R^2 = 0,999) de la forme:

$$f\ \mathrm{Re} = -12.531 \cdot \left(\frac{H}{W}\right)^3 + 32.926 \cdot \left(\frac{H}{W}\right)^2 - 30.148 \cdot \left(\frac{H}{W}\right) + 23.877 \qquad \textbf{Eq 6. 47}$$

Ce qui donne la relation suivante pour le facteur de frottement *f*

$$f = \frac{\mu_{bf}}{D_h \cdot U_0 \cdot \rho_{bf}} \left[-12.531 \cdot \left(\frac{H}{W}\right)^3 + 32.926 \cdot \left(\frac{H}{W}\right)^2 - 30.148 \cdot \left(\frac{H}{W}\right) + 23.877 \right] \qquad \textbf{Eq 6. 48}$$

La perte totale d'exergie sera :

$$\dot{E}x_{loss,tot} = \dot{E}x_{loss,Q} + \dot{E}x_{loss,fr} \qquad \textbf{Eq 6. 49}$$

Le taux de génération d'entropie totale du collecteur (PV/T) est égal à :

$$\dot{S}_{gen,tot} = \frac{\dot{E}x_{loo,tot}}{T_{amb}} = \frac{\dot{E}x_{loss,Q}}{T_{amb}} + \frac{\dot{E}x_{loss,fr}}{T_{amb}} = \dot{S}_{gen,Q} + \dot{S}_{gen,fr} \qquad \textbf{Eq 6. 50}$$

où $\dot{S}_{gen,Q}$ et $\dot{S}_{gen,fr}$ sont la génération d'entropie due au transfert de chaleur et au frottement du fluide, respectivement.

Conclusion :

Dans ce chapitre IV, un cas d'étude d'un capteur solaire hybride PVT à base d' un nanofluide eau–TiO_2est modélisé et simulé. Toutes les équations des analyses énergétiques et exergétiques ainsi que les conditions aux limites sont présentées. Pour la détermination des propriétés thermophysiques du nanofluide eau–TiO_2, les mesures expérimentales faites par (Duangthongsuk and Wongwises 2009), (He, Men *et al*. 2009) et (Masuda, Ebata *et al*. 1993), ont été sélectionnées. Le code Ansys Fluent est utilisé pour les calculs numériques.

CHAPITRE VII

RÉSULTATS ET DISCUSSION SUR LE (PV/T) À BASE DE NANOFLUIDE EAU-TiO_2

Préambule :

Ce chapitre présente les résultats des simulations numériques du capteur hybride à base de nanofluide eau–TiO_2. Aussi, et dans un souci de comparaison des performances énergétique et exergétique de ce PVT, on a donc eu recourt à une comparaison avec le PVT du type plaque et tubes étudié par Sardarabadi *et al*. (2016 & 2017). Ces dernières études restent les plus proches au cas proposé dans ce travail de thèse, puisqu'elles concernent une étude de simulation et d'expérimentation d'un PVT à base d'un nanofluide eau–TiO_2

7. Résultats et Discussions

7.1 Vue d'ensemble des différentes études énergétiques et exergétiques du (PV/T) :

Une revue bibliographique des études réalisées sur les analyses énergétiques et exergétiques du capteur solaire hybride (PV/T), met en évidence trois catégories d'approches. Une première adoptée par plusieurs auteurs, dont les plus cités sont [25], [235], [236], considèrent l'irradiation solaire incidente globale sur le capteur solaire hybride G_T dans les calculs des rendements d'énergie (η) et d'exergie (ε), respectivement.

Un deuxième groupe comprenant [237] utilise l'irradiation solaire efficace G_{Teff} donnée par l'Equation **6-25** pour calculer l'efficacité exergétique; cependant, pour le calcul de l'efficacité énergétique, ils utilisent plutôt l'irradiation solaire globale. Le troisième groupe de chercheurs comme [44] et [238, 239] utilise pour (η) ou (ε) la valeur de l'irradiation solaire effective incidente.

Ces faits devront donc être pris en compte lors des études de validation ou de comparaison avec d'autres chercheurs, car les valeurs de l'efficacité énergétique et exergétique obtenues selon l'approche adoptée seront certainement différentes. Dans le présent travail de doctorat, les analyses énergétiques et exergétique présentées dans les sous-sections 6.4.1 et 6.4.2, respectivement, considèrent le collecteur hybride (PV/T) comme un volume de contrôle auquel sont appliqués les bilans énergétique et exergétique. L'irradiation solaire incidente G_T est donc prise dans son intégralité comme énergie d'entrée dans le volume de contrôle et sera utilisée comme telle dans tous les calculs des rendements énergétique et exergétique du collecteur hybride (PV/T). L'irradiation solaire effective sera prise en compte dans le bilan énergétique, en considérant la transmissivité du verre (τ_g) ainsi que l'absorption des cellules photovoltaïques (α_c). Cependant, et dans un souci de comparaison avec d'autres auteurs utilisant l'irradiation solaire efficace dans leurs calculs, nous présenterons également nos résultats d'efficacité η or εavec G_{Teff}.

7.2Comparaison avec Nahar et al [44] :

[44] ont simulé, et également expérimenté un collecteur hybride (PV/T) à base d'eau avec COMSOL Multiphysics. Ainsi, la première partie concernera la validation de notre modèle en comparant nos résultats numériques aux mesures expérimentales de [44].

Dans les tableaux 7-1 et 7-2 ci-dessous, des détails concernant les matériaux des différentes couches du (PV/T), leurs dimensions et leurs propriétés thermophysiques sont fournis.

Tableau 7- 1 :Épaisseur et propriétés de chaque matériau utilisé dans les simulations **[44]**.

Matériaux	Couche	Densité (kg/m^3)	Conductivité thermique (W/m·K)	Chaleur spécifique (J/kg·K)	Epaisseur (mm)
Verre	haut/bas	2450	2	500	3
Eau	Fluide	Variable(*T*)	Variable (*T*)	Variable (*T*)	Variable
EVA	Encapsulent	950	0.311	2090	0.8
Silicon	PV cell	2329	148	700	0.1
Tedlar	Couver	1200	0.15	1250	0.05
Pate thermique	Conducteur	2600	1.9	700	0.3
Polyuréthane	Isolation	31	0.049	2996	40
Aluminium	canal	2700	160	900	1

Tableau 7- 2: Les données d'entrées des simulations.**[44]**.

Variable	Valeur	Description	Unités
β_{ref}	0.00045	coefficient de température de PV cell	1/K
η_{ref}	0.13	Rendement aux conditions standard	–
T_{ref}	298.15	Température de Reference	K
L_c	1350	Longueur du canal d'eau	mm
W_c	920	Largeur du canal d'eau	mm
τ_g	0.9	Transmisivité du verre	–
α_c	0.9	Absorbitivité du verre	–
F	1	Facteur d'empilement	–
αt	0.5	Absorbitivité de Tedlar	–
T_{amb}	34	Température Ambiante	°C
T_{in}	34	Température d'entrée de l'eau	°C
ε_g	0.3	Emissivité de la surface du verre	–

À partir des figures 7-1 et 7-2, nous notons que la concordance entre les résultats numériques actuels et les mesures expérimentales de [44]est très bonne. En effet, l'écart par rapport à la température moyenne des cellules photovoltaïques ne dépasse pas 1%, tandis que pour le rendement électrique du PV ; la différence entre les valeurs mesurées et calculées est inférieure à 0,9%.

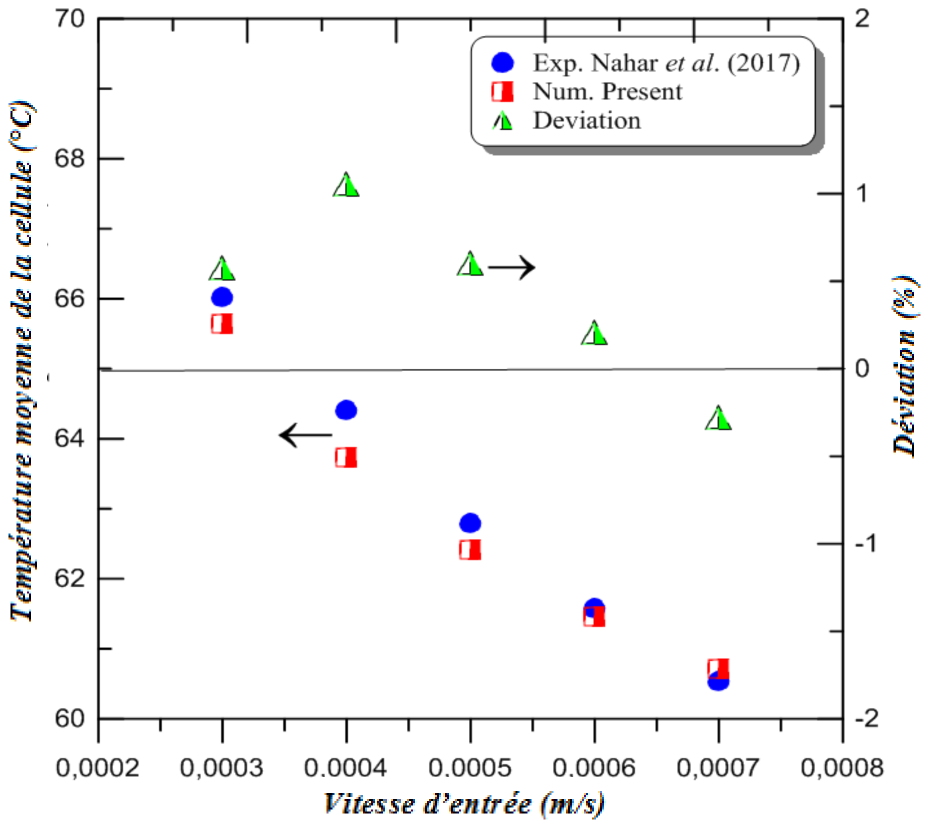


Figure 7- 1 :Effet de la vitesse d'entrée de l'eau sur la température moyenne de la cellule PV.

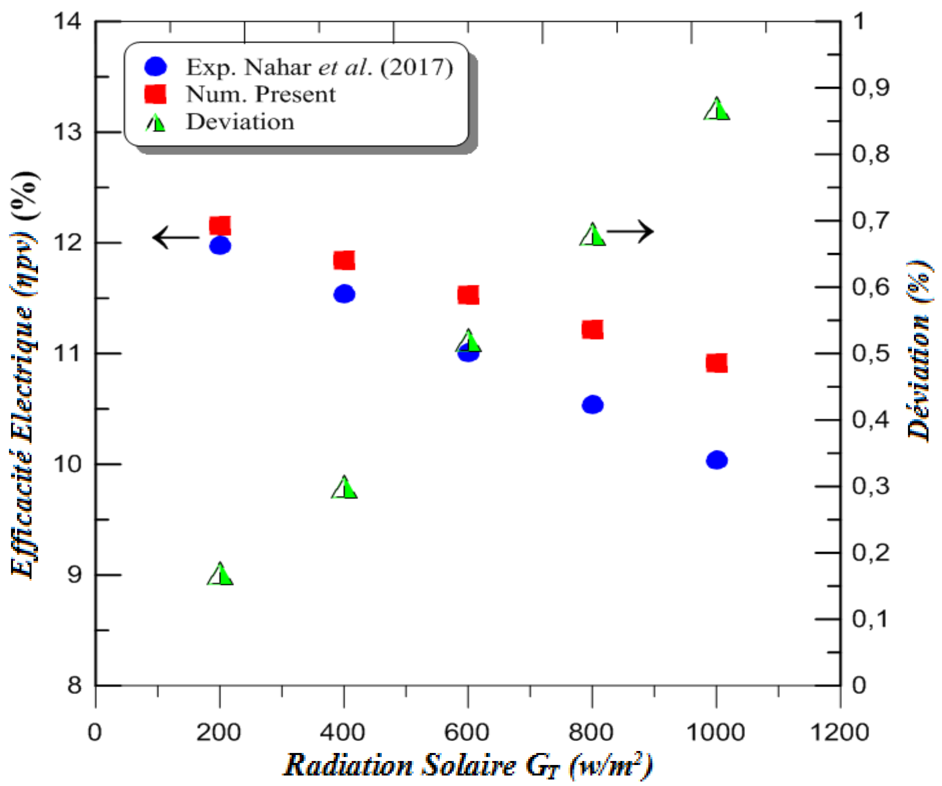


Figure 7- 2:Effet de l'irradiation solaire sur le rendement électrique du PV.

7.3 Comparaison avec l'étude de [238, 239] :

[238, 239] ont étudié théoriquement et expérimentalement les performances du point de vue énergétique et exergétique d'un collecteur hybride (PV/T) avec le nanofluide eau-TiO_2 comme fluide de refroidissement dont la concentration massique et le débit massique sont égaux à 0,2% en poids (correspondant approximativement à 0,0047% de fraction volumique) et 30 kg/h, respectivement. Le panneau photovoltaïque (silicium monocristallin) a été placé sur la plaque absorbante (type plaque et tube). Les propriétés du module PV et du collecteur thermodynamique sont données dans le tableau 8-3 ci-dessous. L'objectif est de déterminer les performances énergétiques et exergétiques du collecteur hybride (PV/T) avec canal rectangulaire et de les comparer à celles de [238, 239] avec plaque et tubes. Par conséquent, les dimensions du canal de refroidissement rectangulaire sont égales à celles du PV de [238, 239], et la hauteur est fixée égale à 3 cm; une valeur sélectionnée proche de la hauteur optimale du canal de refroidissement (voir chapitre 8 pour plus de détails).

Tableau 7- 3 : Propriétés et paramètres de conception du collecteur (PV/T) expérimenté par **[238, 239]**.

Cellule photovoltaïque solaire (aux conditions standards)	
Type	Monocristalline silicone
Puissance Maximale (W)	40
dimension de la Cellule PV (mm)	62.5 x 125
Nombre de Cellules	36
Longueur du module (mm)	562.5
Largeur du module (mm)	500
Rendement du Module (%)	15
Coefficient de Température β_{ref} (1/K)	0.004
Collecteur Plat	
Type	Feuille et tube
Matériau du Tube	Cuivre
Debit massique (kg/h)	30
Fluide de Refroidissement	Nanofluide Eau-TiO_2
Concentration Massique wt (%)	0.2

7.3.1 Température de la surface

Sur la figure 8-3, on note que pour une température moyenne d'entrée du nanofluide eau-TiO_2 égale à 39,7°C, l'utilisation de (PV/T) permet un refroidissement efficace des cellules photovoltaïques. En effet, si la température moyenne journalière de surface du module PV seul est approximativement égale à 64,6°C, une diminution de sa température est obtenue en utilisant un collecteur hybride (PV/T) à base d'un nanofluide eau-TiO_2. Pour le système proposé par [238, 239], la différence de température moyenne rapportée par les auteurs est de 11,48 °C; par contre, elle est beaucoup plus élevée pour le système (PV/T) proposé dans la présente étude (type canal rectangulaire). En effet, et en fonction de la hauteur *H* du canal de refroidissement, on obtient des différences de température de 20,54°C et 18,1°C pour *H* égal 2 cm et 5 cm, respectivement. Cela montre que le meilleur système de refroidissement des cellules photovoltaïques doit utiliser des canaux de faible hauteur; ce résultat est donc similaire à la proposition de [45] avec mini-canaux en aluminium.

Par ailleurs, il est tout aussi important de noter que des températures élevées de l'ordre de 70°C ont été mesurées par [238, 239] pour le panneau photovoltaïque sans système de refroidissement entre 12h et 14h30, ceci pour une température ambiante moyenne de 34 °C. La situation deviendra encore plus critique lorsque les températures ambiantes seront plus élevées, en particulier dans le cas des pays chauds ou pendant la saison estivale comme c'est le cas en Algérie. Pour le (PV/T) avec canal de refroidissement, la température moyenne de surface dépasse à peine 45°C pour *H* égal à 3 cm et peut être réduite jusqu'à 44°C pour *H* égal à 2 cm.

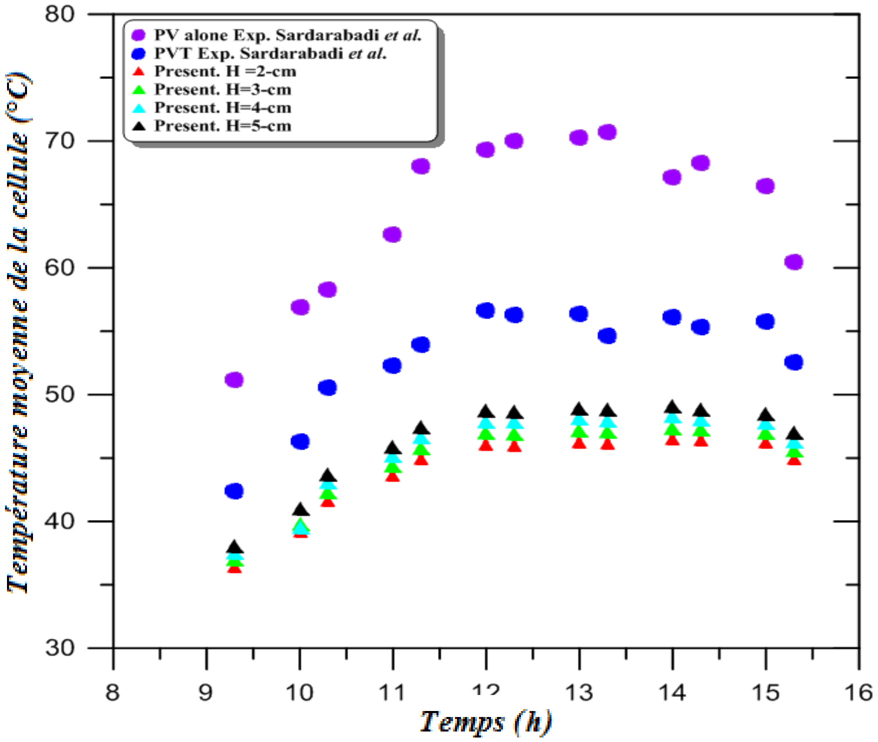


Figure 7- 3 :Comparaison de la température de surface mesurée quotidiennement du PV et (PV/T) par **[238, 239]** avec le présent (PV/T) calculé pour différentes hauteurs de canal.

7.3.2 Température de Sortie du Nanofluide :

En ce qui concerne les températures de sortie du nanofluide eau-TiO_2, et comme le montre la figure 7-4, pendant la période de 9h00 à 12h30, les valeurs calculées à partir des simulations pour différentes hauteurs *H* du canal sont presque confondues avec mesurées par [238, 239]; il en résulte à peu près la même quantité d'énergie thermique collectée par les deux types de (PV/T). Cependant, après 13h00, on constate qu'il existe une petite différence en termes de températures de sortie entre les deux systèmes (PV/T); cela générera une quantité moyenne quotidienne d'énergie thermique par unité de surface égale à 278,63 W/m^2 pour un (PV/T) avec un canal de 3 cm de hauteur, alors qu'elle est de 310,44 W/m^2 pour [238, 239]. Pour un (PV/T) à base d'eau, [238, 239] ont obtenus une valeur beaucoup plus faible égale à 236,96 W/m^2, ce qui est environ 31% inférieur à celle du (PV/T) à base de nanofluide TiO_2-eau avec une teneur massique en nanoparticules aussi petite que 0,2%.

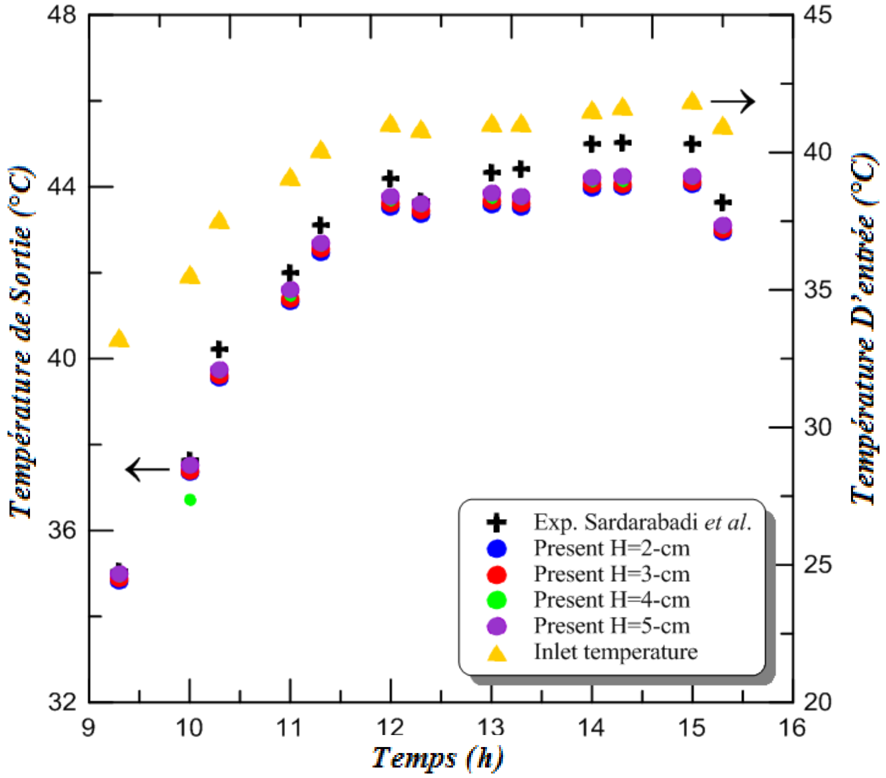


Figure 7- 4: Comparaison de la température de sortie du nanofluide eau-TiO_2 mesurée quotidiennement du (PV/T) par **[238, 239]** avec celle calculée pour le (PVT) à canal pour différentes hauteurs de canal.

7.3.3 L'Exergie électrique :

Sur la figure 7-5, une comparaison des variations journalières de l'exergie électrique des capteurs solaires hybrides (PV/T) de [238, 239]et les présents calculs pour un (PV/T) avec un canal de refroidissement de H = 3 cm. Deux types de résultats de calculs sont présentés ; l'un avec G_T, l'autre avec G_{Teff}.

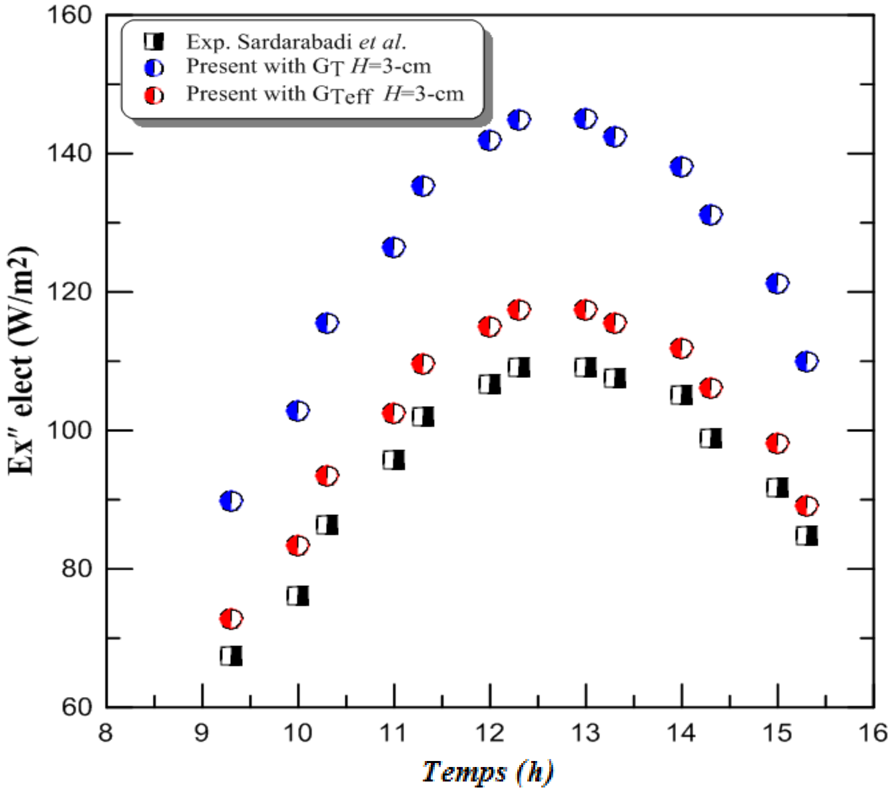


Figure 7- 5 :Comparaison de l'exergie électrique quotidienne par unité de surface du (PV/T) par **[238, 239]** avec celle calculée pour le présent (PV/T) pour l'irradiation solaire totale G_T et sa valeur effective G_{Teff}. (*H* =3-cm).

L'exergie par unité de surface (W/m^2) du collecteur à canal est toujours supérieure à celle de [238, 239] (plaque et tubes), avec des différences particulièrement importantes lorsque l'on considère G_T dans les calculs.

7.3.4 L'Exergie Thermique :

En ce qui concerne l'exergie thermique par unité de surface (W/m^2) et comme le montre la figure 8-6, il n'y a pas de différence significative entre les deux capteurs hybrides de 9h30 à 12h00. Cependant, à partir de 13h00, l'exergie thermique du (PV/T) de [238, 239] est supérieur à celle avec canal rectangulaire. La raison, comme le montre la figure 8.8, est liée aux températures de sortie de [238, 239] qui sont supérieurs à celles obtenues avec le type canal (PV/T) et selon l'Equation 7-32 l'exergie thermique est égale à l'énergie thermique multipliée par le facteur $\left(1-\frac{T_{amb}}{T_{out}}\right)$ (L'éxergie thermique est proportionnelle à la température de sortie du fluide).

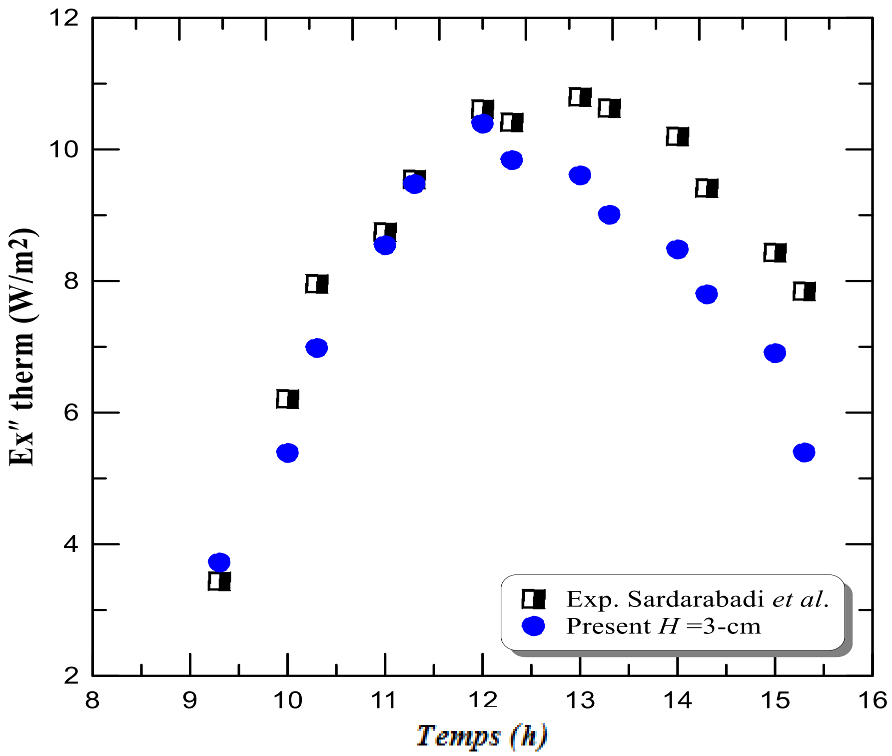


Figure 7- 6 :Comparaison de l'exergie thermique quotidienne par unité de surface du (PV/T) par **[238, 239]** avec celle calculée pour le (PV/T) à canal(H = 3 cm).

7.4 Autres résultats :

7.4.1 Le rendement électrique :

Sur la figure 7-7, les variations quotidiennes de l'efficacité électrique du (PV/T) pour différentes hauteurs du canal de refroidissement montrent une diminution continue avec l'augmentation de la température ambiante. Une amélioration de la valeur du rendement est obtenue en réduisant la hauteur du canal, ce qui augmentera la vitesse d'écoulement du nanofluide (le débit massique est invariablement égal à 30 kg/h) et donc également le coefficient de transfert de chaleur par convection. L'écoulement du nanofluide est considéré comme permanent, incompressible, laminaire et totalement établi dans un canal rectangulaire avec des conditions aux limites thermiques adiabatiques sur les parois latérales et la plaque inférieure, tandis que la plaque supérieure est soumise à un flux de chaleur constant. Dans ces conditions, le nombre de Nusselt est constant et égal à 5,384 (c.f. équation 6-15). Le coefficient de transfert de chaleur par convection est égal à : $h = \dfrac{5.384 \cdot \lambda_{nf}}{D_h}$

Il augmente que ce soit lorsque la conductivité thermique du nanofluide augmente (avec le volume ou la concentration massique des nanoparticules), et/ou lorsque le diamètre hydraulique du canal diminue (avec la diminution de la hauteur du canal). Si un système à base d'eau ou de nanofluides (PV/T) est utilisé dans le but ultime de refroidir les cellules PV, dans ce cas, le refroidissement par mini-canaux est la solution de choix car il améliore le rendement électrique du PV, cependant, comme cela sera expliqué plus en détail dans la sous-section suivante 7.2, ce n'est pas une solution recommandée si également l'efficacité thermique, l'exergie thermique ou l'efficacité globale sont les paramètres cibles du système hybride (PV/T).

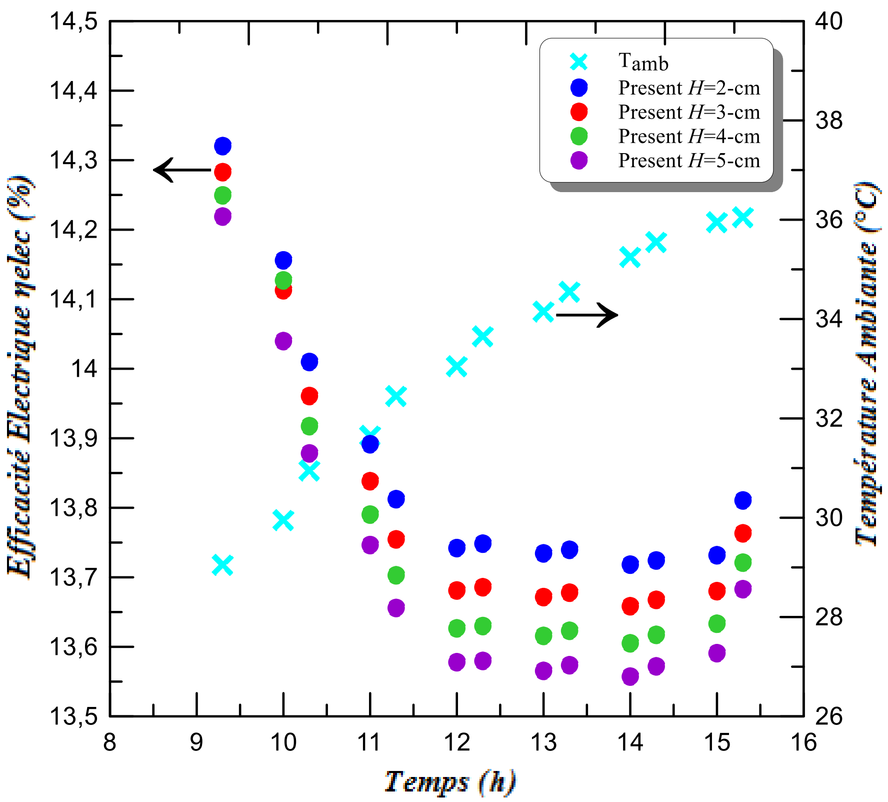


Figure 7- 7:Variation quotidienne du rendement électrique calculé du (PV/T) à canal pour différentes hauteurs du canal de refroidissement *H*.

7.4.2 Le rendement Thermique :

On peut voir sur la figure 8-8 que le rendement thermique quotidien diminue également avec l'augmentation de la température ambiante, mais la raison est tout à fait différente de celle du rendement électrique. Selon l'équation. 7-26, le rendement thermique de (PV/T) est proportionnel à la différence de température (T_{outlet}–T_{inlet}) et inversement proportionnel au rayonnement solaire global incident. La figure 8-4 montre que (T_{outlet}–T_{inlet}) diminue entre 9h et 12h, pour se stabiliser pratiquement entre 12h et 15h, et enfin recommence à augmenter à partir de 15h30. En revanche, le rayonnement solaire suit une variation périodique avec des valeurs maximales entre 12h et 14h30, avant de diminuer progressivement. La combinaison de ces deux effets est donc à l'origine des variations de η_{th}. Par ailleurs, l'augmentation de la

hauteur du canal *H* entraîne un accroissement de la température de sortie du nanofluide; ce fait conduit à une augmentation du rendement thermique et, par conséquent, la réduction de la hauteur du canal n'est pas une solution recommandée pour améliorer le rendement thermique du collecteur solaire hybride (PV/T).

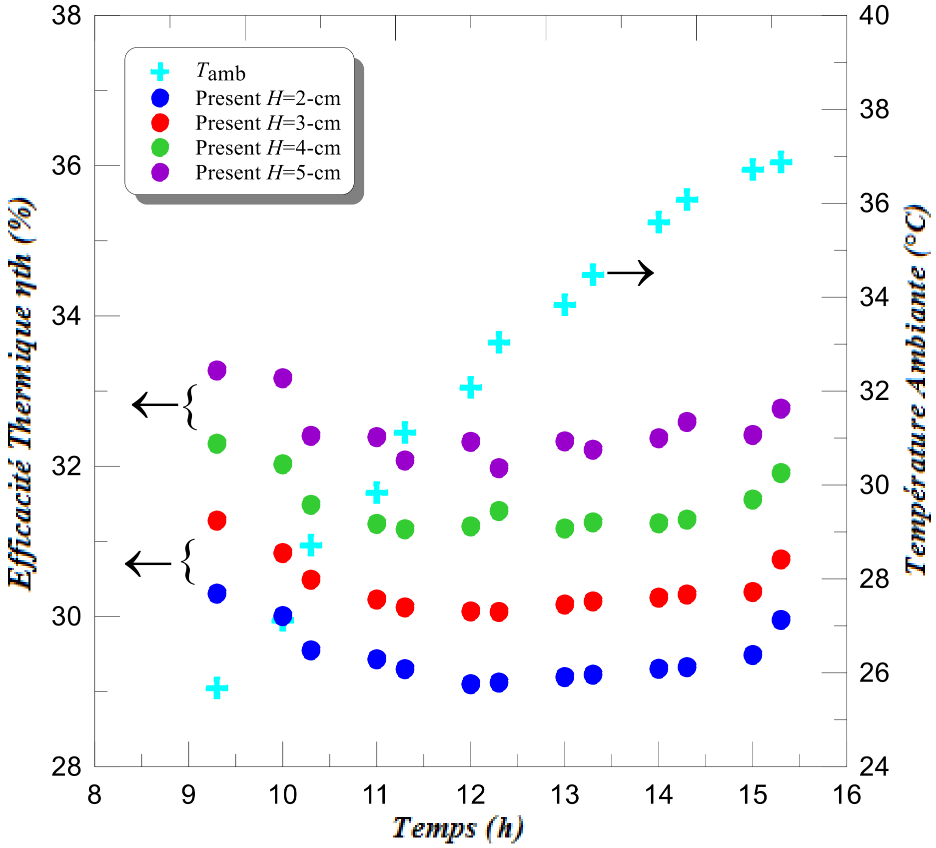


Figure 7- 8 :Variation quotidienne du rendement thermique pour le (PV/T) avec canal en utilisant l'irradiation solaire totale G_T pour différentes hauteurs *H* de canal de refroidissement.

7.4.3 L'énergie et exergie totales :

Sur la figure 7-9, les variations quotidiennes des rendements énergétiques et exergétiques globaux du collecteur hybride (PV/T) avec canal de refroidissement sont présentées. On notera ici que les valeurs sont différentes selon le cas où G_T ou G_{Teff}sont pris en compte dans les calculs. Ce fait important doit être considéré lors des comparaisons entre différents systèmes hybrides pour éviter des interprétations erronées des résultats obtenus.

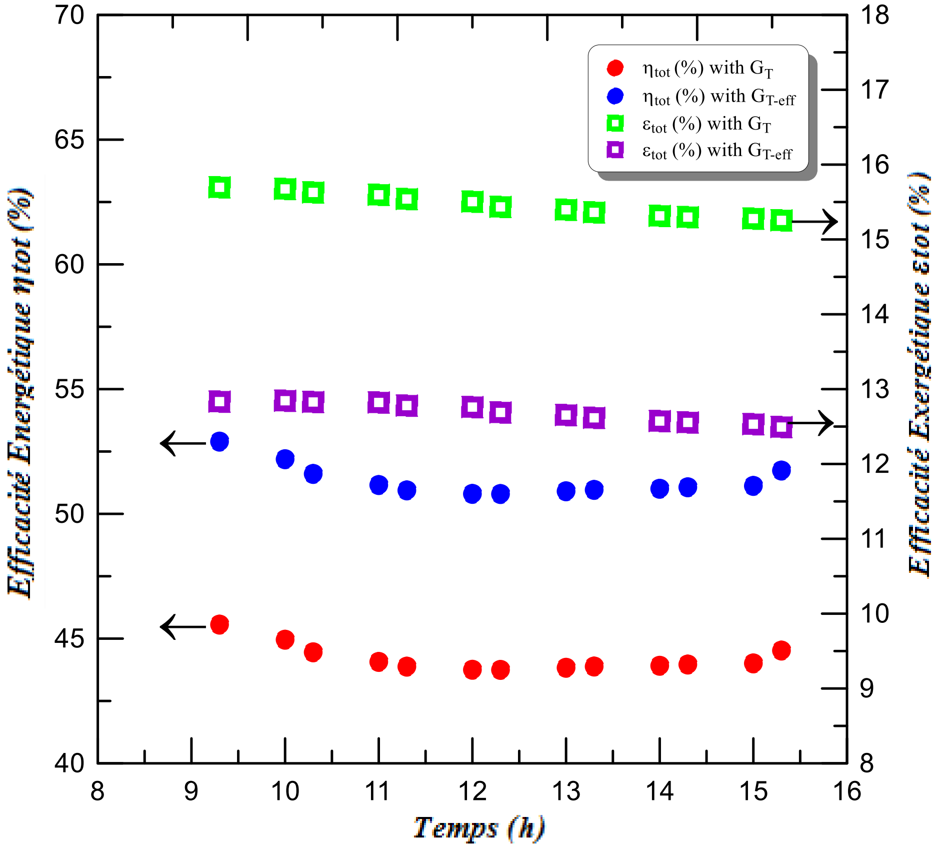


Figure 7- 9:Variation quotidienne des rendements énergétiques et exergétiques globaux pour le capteur hybride(PV/T) avec canal de refroidissement.

Les résultats les plus importants des valeurs moyennes obtenus à partir des analyses d'énergie et d'exergie du collecteur hybride (PV/T) type canal de refroidissement rectangulaire à base de nanofluide TiO_2-eau sont donnés dans les tableaux 7-4 à 7-7 ci-dessous.

Les tableaux 7-4 et 7-5 montrent respectivement les résultats de l'analyse énergétique et exergétique. Ils sont obtenus en utilisant le rayonnement solaire incident global G_T. Pour les calculs avec le rayonnement solaire effectif G_{Teff}, les tableaux 7-6 et 7-7 présentent respectivement les résultats des analyses d'énergie et d'exergie. Immédiatement, on peut remarquer que les valeurs sont différentes selon le cas que l'on considère G_T ou G_{Teff}. Tous les résultats des calculs correspondent à un canal avec une hauteur sélectionnée H = 3 cm (proche de la hauteur optimale qui sera déterminée dans le chapitre 8).

Tableau 7- 4 : Résultats des calculs selon la première loi de la thermodynamique utilisant l'irradiation solaire globaleG_T et H=3cm. (Cas de la moyenne sur une d'une journée).

T_{cell} (°C)	T_{outlet} (°C)	η_{pv} (%)	η_{th}(%)	η_{pvt}(%)	E''_{elc} (W/m^2)	E''_{ther} (W/m^2)	E''_{pvt} (W/m^2)	G_T(W/m^2)
44.9	41.94	13.8	30.38	44.18	126.52	278.63	405.15	918.3

Tableau 7- 5:Résultats des calculs selon la deuxième loi de la thermodynamique utilisant l'irradiation solaire globale G_T et H=3cm. (Cas de la moyenne sur une d'une journée).

ε_{pv} (%)	ε_{ther} (%)	ε_{pvt}(%)	$E_x''_{elec}$ (W/m^2)	$E_x''_{ther}$ (W/m^2)	$E_x''_{pvt}$ (W/m^2)	$E_x''_{sun}$ (W/m^2)	$E_x''_{loss}$ Q (W/m^2)	$E_x''_{loss}$ fric (W/m^2)	$E_x''_{loss}$ pvt (W/m^2)	$S_{gen\ tot}$ (W/K·m^2)
14.57	0.88	15.46	126.52	7.8	134.32	869.51	629.63	2.72x10^{-9}	629.63	2.053

Tableau 7- 6*:*Résultats des calculs selon la première loi de la thermodynamique utilisant l'irradiation solaire globaleG_{Teff} et H=3cm. (Cas de la moyenne sur une d'une journée).

T_{cell} (°C)	T_{outlet} (°C)	η_{pv} (%)	η_{th} (%)	η_{pvt} (%)	E''_{elc} (W/m^2)	E''_{th} (W/m^2)	E''_{pvt} (W/m^2)	G_{Teff} (W/m^2)
44.9	41.94	13.8	37.51	51.31	102.46	278.63	381.09	743.82

Tableau 7- 7*:* Résultats des calculs selon la deuxième loi de la thermodynamique utilisant l'irradiation solaire globaleG_{Teff} et H=3cm. (Cas de la moyenne sur une d'une journée).

ε_{pv} (%)	ε_{th} (%)	ε_{pvt}(%)	$E_x''_{elec}$ (W/m^2)	$E_x''_{th}$ (W/m^2)	$E_x''_{pvt}$ (W/m^2)	$E_x''_{sun}$ (W/m^2)	$E_x''_{loss\text{-}Q}$ (W/m^2)	$E_x''_{loss\text{-}fr}$ (W/m^2)	$E_x''_{loss}$ pvt (W/m^2)	$S_{gen\ tot}$ (W/K·m^2)
11.8	0.88	12.68	102.48	7.8	110.28	704.3	653.67	2.72x10^{-9}	653.67	2.13

Un résumé d'une comparaison des performances énergétiques et exergétiques d'un capteur solaire hybride à plaque et tubes expérimenté par [238, 239] avec celui à canal de refroidissement tel que proposé par [44] est fourni dans le tableau 7-8 ci-dessous. Si une discussion détaillée a déjà été donnée précédemment, il convient cependant de noter que les valeurs de l'irradiation solaire efficace incidente sur le (PV/T) c'est-à-dire G_{Teff}, et son exergie $E_x''_{sun}$de [238, 239] restent discutables, puisque l'exergie ne peut en aucun cas dépasser en valeur absolue l'énergie à partir de laquelle elle a été «crée».

On notera que la comparaison des performances énergétiques des deux types de (PV/T) fait ressortir les observations suivantes :

- Par rapport au type plaque et tubes ou (S&T), le (PV/T) avec canal admet un meilleur refroidissement des cellules PV, ce qui se traduit non seulement par une efficacité électrique supérieure mais également une protection plus élevée lorsque les températures ambiantes dépassent les 45 °C.
- Le rendement thermique du type (PV/T) (S&T) est supérieur à celui du type à canal (respectivement 44,34% et 37,51%). Les quantités d'énergie thermique collectées sont ainsi beaucoup plus importantes avec un écart de près de 11,44%, et par conséquent, l'efficacité d'exergie thermique ε_{th}de [238, 239] est supérieur à celle du type canal. Malgré ce fait, l'efficacité exergétique totale de (PV/T) ε_{tot}avec canal reste supérieure à celle de [238, 239]puisque l'énergie électrique a une "qualité" supérieure par rapport à l'énergie thermique.

Tableau 7- 8 :Résumé des résultats des calculs de la première et deuxième loi de la thermodynamique en utilisant l'irradiation solaire globale efficace G_{teff} et H = 3 cm. (Cas de la moyenne sur une journée).

Paramètres Energétique et Exergetique	Résultats du Présent travail	Sardarabadi *et al*.
$\Delta T = T_{pv} - T_{pvt}$	19.65	11.48
η_{pv} (%)	13.80	13.63
η_{th} (%)	37.51	44.34
η_{pvt} (%)	51.31	57.97
E''_{th} (W/m^2)	278.63	310.44
E''_{elc} (W/m^2)	102.46	95.42
ε_{pv} (%)	11.80	11.02
ε_{th} (%)	0.88	0.91
ε_{pvt} (%)	12.68	11.93
G_{Teff}(W/m^2)	743.82	702
$E_x''_{sun}$ (W/m^2)	704.3	868
Énergie disponible (W/m^2)	381.09	405.86
Parte d'Energie E''_{loss}Q (W/m^2)	362.73	296.14
$E_x''_{loss}$ fr (W/m^2)	$2.72\text{x}10^{-9}$	0.025
$E_x''_{loss}$Q (W/m^2)	653.67	764.6
$E_x''_{loss}$ pvt (W/m^2)	653.67	764.62
$S_{gen\ tot}$ (W/K·m^2)	2.13	2.49

- Comme attendu, le (PV/T) avec canal présente une très faible perte d'exergie par frottement par rapport au (PV/T) de type (S&T) étudié par [238, 239].

- La perte d'exergie due au transfert de chaleur est plus faible pour le (PV/T) avec un canal puisque se référant aux équations. (6-38), (6-39) et (6-40), on peut noter qu'une température de sortie importante du nanofluide entraînera une importante perte

d'exergie; les températures de sortie des nanofluides pour le (PV/T) de [238, 239]. sont plus élevées que celles du type de canal (voir sous-section 7.3.2 et Figure 7-4).

- L'entropie totale générée dans le (PV/T) avec un canal est donc inférieure à celle du (PV/T) de [238, 239], Cela se traduit par une énergie plus faible requise pour faire circuler le nanofluide.
- Les performances selon la première et seconde loi de la thermodynamique des collecteurs hybrides (PV/T) type (S&T) et canal à base de nanofluide eau-TiO_2 sont donc très différentes. Le (PV/T) (S&T) de [238, 239] a un meilleur rendement thermique de 44,34%. Cette valeur est assez surprenante car en comparaison avec le (PV/T) utilisant de l'eau, [238, 239]trouvent un rendement thermique juste égal à 34,12%. La différence est donc de près de 30%; ce qui est très important compte tenu du fait que la quantité de nanoparticules de TiO_2 utilisée dans le nanofluide est très faible (0,2 wt%).
- Avec une fraction massique de 0,2%, la chaleur spécifique du nanofluide eau-TiO_2 diminue par rapport à celle de l'eau : respectivement 4172 (J/kg·K) et 4179 (J/kg·K) pour le nanofluide et l'eau. Ainsi, et à débit massique constant, pour que le rendement thermique du nanofluide (PV/T) augmente très nettement par rapport à celui à base d'eau, la température de sortie du nanofluide doit être nettement supérieure à celle de l'eau. Cependant, la conductivité thermique du nanofluide n'est égale qu'à 0,64 (W/m·K) tandis que celle de l'eau 0,63 (W/m·K), ce qui correspond à une augmentation de 1,6%. Cette faible valeur ne peut donc expliquer l'augmentation de 30% du rendement thermique de (PV/T) par [238, 239].

7.4.4 Effet de la teneur en fraction massique (φm %) :

Comme mentionné par plusieurs auteurs dont [219], de nombreuses études de systèmes thermiques utilisant des nanofluides présentent des résultats qui ne sont pas cohérents, comme c'est le cas avec la présente étude et celle de [238, 239]. Les propriétés du nanofluide varient avec la fraction massique (ou volumique) des nanoparticules ; la conductivité thermique augmente, la chaleur spécifique diminue, la viscosité dynamique augmente et, bien entendu, la densité augmente également avec l'augmentation de la valeur de la fraction massique. Ces variations dépendent donc d'un nanofluide à l'autre (en fonction des propriétés thermophysiques du fluide de base et des nanoparticules).

Pour cette étude, il est donc important de vérifier l'influence de la fraction massique (ou volumique) sur les performances énergétiques du collecteur hybride (PV/T) à base de nanofluide eau-TiO_2. En considérant la hauteur du canal H égale à 3 cm, trois fractions massiques φ_m (%) sont considérées ; 0% (eau), 0,2% et 4,127% ((ϕ_v = 1%), respectivement ; cette dernière valeur correspond à la fraction massique la plus élevée tout en évitant l'effet d'agglomération.

Le tableau 7-9 montre que le collecteur hybride à base de nanofluides eau-TiO_2 (PV/T) n'a qu'un faible avantage en termes d'efficacité énergétique par rapport au collecteur (PV/T) à base d'eau. Du point de vue exergétique, en revanche, le (PV/T) à base d'eau est meilleur, même par rapport au nanofluide à forte fraction massique (4,127%) car la température de

sortie T_{out} de l'eau est supérieure aux températures des deux nanofluides ; 0,2% et 4,127%, respectivement. Les rendements énergétiques η_{th} et η_{tot} du (PV/T) à base de nanofluides sont supérieurs à ceux utilisant l'eau puisque dans les expériences menées par [238, 239], les températures d'entrée d'eau sont supérieures à celles du nanofluide; il en résulte une valeur inférieure de la différence de température $T_{out}–T_{in}$. Du point de vue efficacité électrique, le (PV/T) à base de nanofluide est supérieur à celui à base d'eau. Ceci est due au fait que le coefficient de transfert de chaleur par convection entre le fluide et la plaque supérieure du canal augmente avec l'augmentation de la conductivité thermique du nanofluide (qui est proportionnelle à la concentration de nanoparticules φ_m (%)). Il faut surtout noter que contrairement à [238, 239], l'augmentation du rendement énergétique reste modérée pour le nanofluide TiO_2-eau lorsque la fraction massique reste faible. Or, il se peut que les rendements soient beaucoup plus élevés que ceux de l'eau lorsque la fraction massique est encore plus importante, cependant, le risque d'agglomération deviendra aussi très important, ce qui n'est pas une solution pratique recommandée.

De plus, les efficacités énergétiques pour le (PV/T) à base d'eau de [238, 239], comme mentionné dans la sous-section précédente, sont égales à η_{th} = 34,12%, η_{elec} = 13,41%, η_{tot} = 47,53%, respectivement. Ces résultats montrent donc que le (PV/T) avec canal de refroidissement est supérieur à celui du type (S&T) de [238, 239] , tandis que pour le cas des nanofluides, le (PV/T) (S&T) de [238, 239]présente des performances supérieures même à faible concentration, ce qui reste, comme expliqué précédemment, soumis à de nombreuses interrogations.

Tableau 7- 9: Effet de la fraction massique φ_m (%) des nanoparticules avec H = 3 cm et G_{Teff}.

φ_m (%)	η_{th} (%)	η_{elec}(%)	η_{tot}(%)	ε_{tot} (%)	T_{out} (°C)	$T_{out}–T_{in}$ (°C)	Cp (J/kg·K)
0 (water)	35.87	13.61	49.48	15.52	45.14	2.153	4179
0.2	37.51	13.80	51.31	15.46	41.94	2.254	4172
4.127	36.68	13.82	50.50	15.47	41.97	2.278	4034.82

Conclusion :

A partir d'une simulation numérique et des études énergétiques et exergétiques d'un capteur solaire hybride photovoltaïque-thermique (PV/T) type canal rectangulaire placé sous le module photovoltaïque dans lequel circule un nanofluide eau-TiO_2, les observations suivantes peuvent être tirées:

1) Un taux de refroidissement très important des cellules photovoltaïques est obtenu dans le cas d'un (PV/T) avec un canal par rapport à celui avec plaque-et-tubes (S&T). En effet, si la température moyenne journalière de surface du module PV seul est approximativement égale à 64,6°C, une diminution de sa température de 19,4 °C pour

le (PV/T) avec canal (H = 3-cm) est obtenue, alors qu'elle est de 11,48 °C pour le type (S&T).

2) Les performances selon la première et seconde loi de la thermodynamique des deux collecteurs hybrides (PV/T) à base d'eau et de nanofluide eau-TiO_2 sont très différentes. Le (PV/T) de Sardarabadi *et al*. [238, 239] (S&T) a un meilleur rendement thermique de 44,34% (37,51% pour le type à canal), cependant, son exergie globale ε_{tot}est plus faible. Par ailleurs, pour l'eau le (PV/T) avec canal de refroidissement est supérieur à celui du type (S&T) de [238, 239] avec 35,87% et 34,12% pour le type de canal et le type (S&T), respectivement.
3) La Comparaison du (PV/T) (S&T) à base d'eau de [238, 239] et celui à base de nanofluide eau-TiO_2 avec une fraction massique de 0,2% de nanoparticules de TiO_2 donne une différence de 30% dans l'efficacité énergétique globale η_{tot}. Pour le (PV/T) avec canal de refroidissement, la différence entre les rendements globaux de l'eau et du nanofluide (φ_m = 0,2%) n'est que de 3,7%.
4) Avec une fraction massique de 0,2%, la chaleur spécifique du nanofluide eau-TiO_2 diminue par rapport à celle de l'eau : 4172 (J/kg·K) et 4179 (J/kg·K).pour le nanofluide et l'eau, respectivement. Ainsi, et à débit massique constant, pour que le rendement thermique du nanofluide (PV/T) augmente très nettement par rapport à celui à base d'eau, la température de sortie du nanofluide doit être nettement supérieure à celle de l'eau. Cependant, la conductivité thermique du nanofluide n'est égale qu'à 0,64 (W/m·K) tandis que celle de l'eau 0,63 (W/m·K), ce qui correspond à une augmentation de 1,6%; cette faible valeur ne peut donc expliquer l'augmentation de 30% du rendement thermique de (PV/T) par [238, 239].
5) Le collecteur hybride (PV/T) à base de nanofluide eau-TiO_2 avec un canal de refroidissement n'a qu'un faible avantage d'efficacité énergétique par rapport au (PV/T) à base d'eau (PV/T). Du point de vue exergétique, en revanche, le (PV/T) à base d'eau est meilleur (même comparé au nanofluide avec une fraction massique élevée de 4,127%) car la température de sortie T_{out} de l'eau est plus élevée que les températures des deux nanofluides ; 0,2% et 4,127%, respectivement.
6) Le collecteur hybride (PV/T) à base de nanofluide eau-TiO_2 ne présente aucun avantage substantiel par rapport au collecteur à base d'eau (PV/T). Il est donc recommandé d'utiliser celui à base d'eau qui garde quasiment les mêmes performances énergétiques tout en évitant l'installation d'équipements spéciaux pour le nanofluide, en plus des problèmes inhérents (agglomération, pompes, etc.).
7) Contrairement à [238, 239], la présente étude montre qu'une augmentation des rendements énergétiques reste modérée pour le (PV/T) à base de nanofluide TiO_2-eau lorsque la fraction massique est faible. Maintenant, il est également possible d'augmenter les rendements par rapport à ceux de l'eau en augmentant encore plus la fraction massique; cependant, le risque d'agglomération deviendra très important, ce qui n'est pas une solution pratique (un maximum de 1,5% de fraction volumique est une valeur seuil recommandée pour éviter l'agglomération).

CHAPITRE VIII

PROPOSITION D'UNE NOUVELLE MÉTHODE DE DÉTERMINATION DE LA HAUTEUR OPTIMALE DU CANAL DE REFROIDISSEMENT

Préambule

Dans ce chapitre, une approche est proposée pour la détermination de la hauteur optimale du canal de section droite rectangulaire. Elle utilise les résultats des simulations du rendement énergétique (η) et du rendement exergétique (ε) du (PV/T).

8. Nouvelle méthode de détermination de la hauteur optimale du canal de refroidissement

Sur la figure 8-1, une des observations les plus originales tirées de cette étude rentrant dans le cadre de la thèse de doctorat est présentée. En effet, il s'avère que les variations du rendement énergétique (η) et du rendement exergétique (ε) de (PV/T) en fonction de la hauteur *H* du canal de refroidissement présentent une sorte d'effets concurrents. De cette figure on peut s'attendre à ce qu'une hauteur optimale du canal puisse exister, sans toutefois pouvoir la déterminer directement à partir de l'intersection des courbes de (η) et (ε), car en valeur absolue, ces rendements sont très différents.

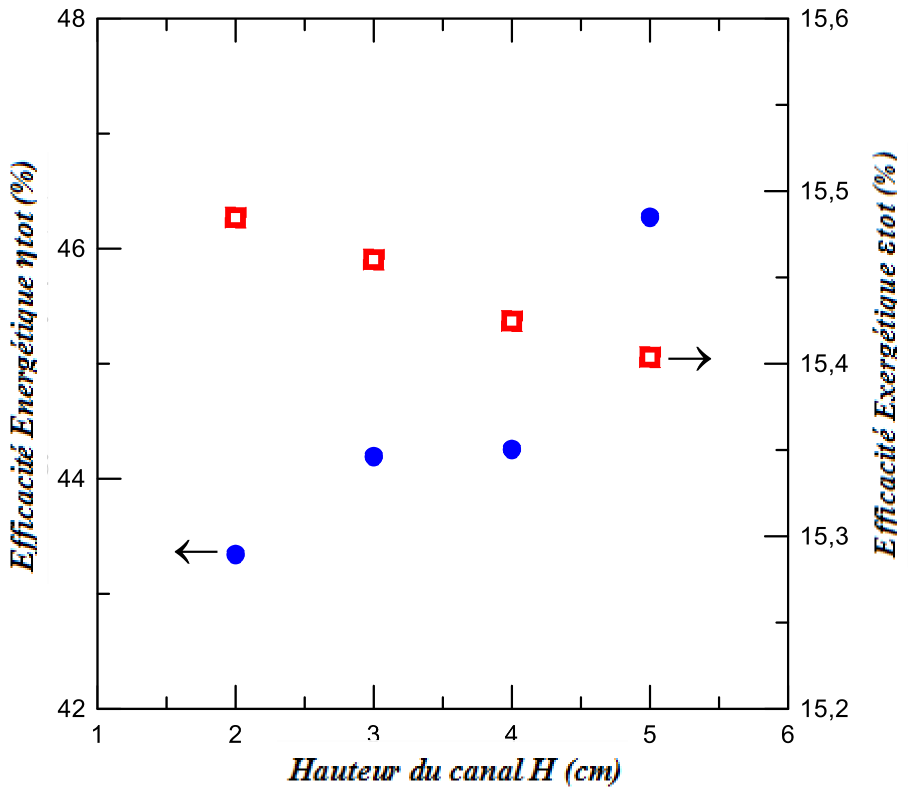


Figure 8- 1:Effet de la hauteur du canal *H* sur le rendement énergétique global (η) et exergétique global (ε) du (PV/T) Hybride avec canal de refroidissement rectangulaire (calculs avec G_T).

Nous proposons donc d'utiliser plutôt la variation de leur différence en fonction de *H*, c'est-à-dire (η(%)−ε(%)).vs.*H*; le résultat obtenu est à la fois très surprenant et original. Sur la figure 8-2 ci-dessous, le graphique de la variation de (η(%)−ε(%)) en fonction de *H* est présenté, et l'équation correspondant au meilleur lissage des points est un polynôme de 3eme ordre avec un

coefficient de corrélation R^2 égale à 1. Cette courbe a donc un point d'inflexion dont la valeur déterminera précisément la hauteur optimale du canal rectangulaire. Cette équation est :

$$\eta(\%) - \varepsilon(\%) = 0.45332 \cdot H^3 - 4.46917 \cdot H^2 + 14.60849 \cdot H + 12.88914 \quad \textbf{Eq 8. 1}$$

Il est facile de vérifier que la dérivée seconde de cette équation s'annule pour une valeur de H = 3,286 cm.

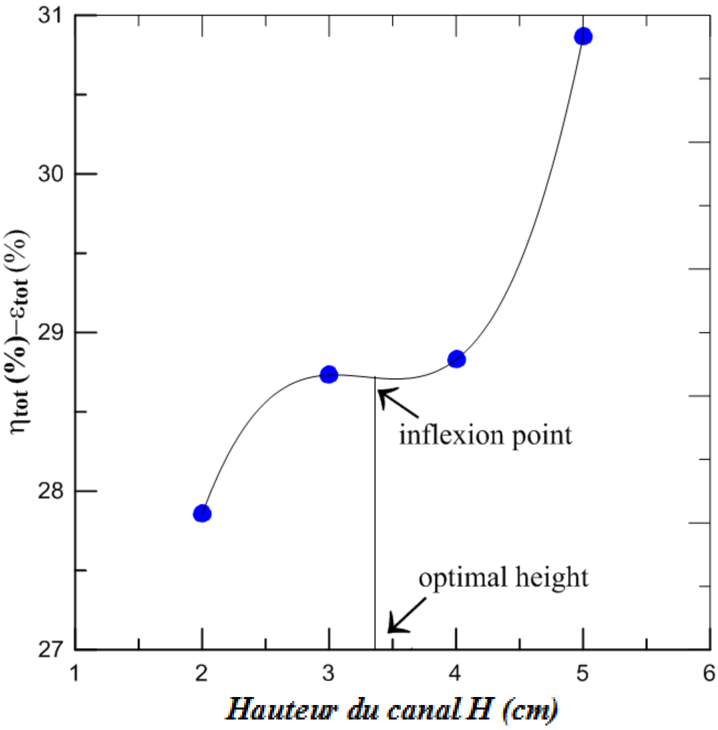


Figure 8- 2:Effet de la hauteur du canal H sur le paramètre (η(%)–ε (%)) (calculs avec G_T).

Pour vérifier si le résultat obtenu et par conséquent l'approche proposée est exact ou non, nous proposons de comparer cette valeur à celle obtenue par une équation dont l'auteur est Adrian Bejan [240] et qui lui a justement value d'être reconnue par un nombre sans dimension portant son nom: le nombre de Bejan *Be*. L'équation donnant la hauteur optimale pour le cas d'un écoulement laminaire entièrement développé en convection forcée est :

$$\frac{H_{opt}}{L} \cong 2 \cdot 1 \left(\frac{\mu_f \alpha_f}{\Delta P \cdot L^2} \right)^{1/4} \quad \textbf{Eq 8. 2}$$

ΔP, L, μ_f et α_f sont respectivement la perte de charge, la longueur du canal de refroidissement, la viscosité dynamique et la diffusivité thermique du fluide. La perte de charge ΔP est calculée par Eq. (6.46), ceci en rappelant que le coefficient de frottement f est calculé à l'aide de l'Eq. (6.48). En remplaçant D_h et le coefficient f par leurs expressions données par les

équations (6.23) et (6.48) dans l'Eq. (6.46), et sachant que $U_0 = \dfrac{\dot{m}_f}{\rho_f\left(H \cdot W\right)}$ après quelques réarrangements, nous obtenons :

$$\Delta P = \left(\frac{L\dot{m}_{bf}\,\mu_{bf}}{8\rho_{bf}}\right) \cdot \frac{\left(H+W\right)^2}{\left(H \cdot W\right)^3} \cdot C_{ch-f} \qquad \textbf{Eq 8. 3}$$

Ceci en définissant le paramètre C_{ch-f} comme :

$$C_{ch-f} = \left[-12.531 \cdot \left(\frac{H}{W}\right)^3 + 32.926 \cdot \left(\frac{H}{W}\right)^2 - 30.148 \cdot \left(\frac{H}{W}\right) + 23.877\right] \qquad \textbf{Eq 8. 4}$$

En remplaçant l'Eq 9.3 dans l'Eq 9.2, et après réorganisation, on obtient :

$$H = 2 \cdot \left[\left(\frac{\lambda_{bf}}{C_{pf}}\right) \cdot \frac{8 \cdot H^3 \cdot \left(W/L\right)^3}{\dot{m}_{bf} \cdot \left(H+W\right)^2 \cdot C_{ch-f}}\right]^{1/4} \cdot L \qquad \textbf{Eq 8. 5}$$

Comme l'Eq 8.5 est non linéaire, nous déterminerons la valeur de *H* en utilisant une approche numérique, où *H* est la racine strictement positive qui minimise Eq 8.6 ci-dessous :

$$H - 2 \cdot \left[\left(\frac{\lambda_f}{C_{pf}}\right) \cdot \frac{8 \cdot H^3 \cdot \left(W/L\right)^3}{\dot{m}_f \cdot \left(H+W\right)^2 \cdot C_{ch-f}}\right]^{1/4} \cdot L = 0 \qquad \textbf{Eq 8. 6}$$

Dans le cas présent, nous avons les paramètres suivants :

λ_{bf}= 0.643 (W/m·K), C_{pf} = 4172 (J/kg·K), *W* = 0.5-m (largeur du panneau PV), *L* = 0.5625-m (longueur du panneau PV), $\dot{m}_{bf}$ =0.008333 (kg/s).

Le paramètre C_{ch-f} sera donc écrit sous la forme suivante :

$$C_{ch-f} = \left[-100.248 \cdot (H)^3 + 131.704 \cdot (H)^2 - 60.296 \cdot (H) + 23.877\right] \qquad \textbf{Eq 8. 7}$$

En remplaçant dans l'Eq 8.6, l'équation à résoudre sera :

$$H - 0.6699 \cdot \left[\frac{H^3}{\left(H+0.5\right)^2 \cdot C_{ch-f}}\right]^{1/4} = 0 \qquad \textbf{Eq 8. 8}$$

En utilisant l'algorithme de la bissection (ou dichotomie) [53], nous trouvons une racine *H* = 3,25 cm lorsque l'équation (8.8) est égale à 7,358 x10^{-5}; cela signifie que la différence entre la valeur trouvée par la méthode proposée basée sur la racine de la dérivée seconde de l'Eq 8.1 et celle de l'Eq 8.8 est égal à 1,1%.

Pour donner une interprétation physique de la hauteur optimale du canal de refroidissement proposé dans ce travail, il sera nécessaire de combiner les Figures 7-9 et 8-1 et notez que le point d'inflexion de la courbe (η_{tot}(%)$-\varepsilon_{tot}$ (%)) .vs. H désigne un passage d'une variation lente à une variation rapide (concave à convexe), ce qui signifie que même si l'énergie perd de sa

Qualité (exergie) au fur et à mesure que H augmente, en contrepartie, l'énergie délivrée par le collecteur hybride (PV/T) augmente rapidement, ce qui constitue une augmentation de la quantité d'énergie malgré la diminution en termes de qualité énergétique. Cependant, à partir du point d'inflexion, l'énergie totale du système alors qu'elle continue d'augmenter, perd de sa qualité (l'exergie) plus rapidement ; sa vitesse de croissance n'est plus ce qu'elle était avant le point d'inflexion, ce qui suppose que l'optimum a été atteint au point d'inflexion, fixant ainsi la valeur de la hauteur du canal de refroidissement. La figure 8-3 avec sa perspective 3D montre clairement la variation de la différence entre l'efficacité totale du collecteur hybride (PV/T) et son exergie; le point d'inflexion correspond à une variation du gradient de cette grandeur physique représentant la différence entre l'énergie délivrée par le collecteur hybride (PV/T) et sa qualité correspondante (exergie); (η_{tot}(%)$-\varepsilon_{tot}$ (%).

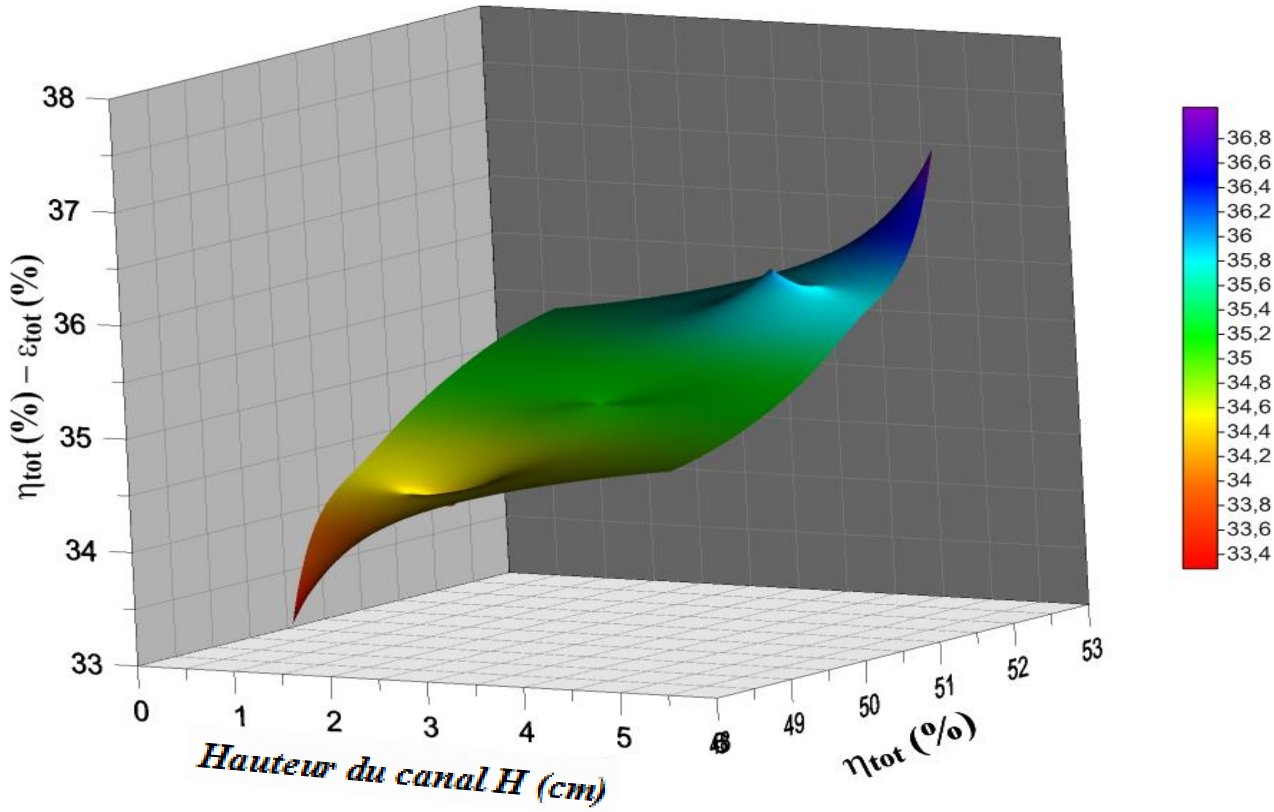


Figure 8- 3:Les variations en 3D du paramètre (η_{tot}(%)$-\varepsilon_{tot}$ (%) en fonction de la hauteur du canal de refroidissement H (cm) et η_{tot}(%).

[240] ont obtenu leurs équation en recherchant l'optimum qui maximise le transfert de chaleur; dans la présente approche, cependant, l'optimum est obtenu en combinant les

efficacités énergétique et exergétique. Cette méthode, qu'il est prévu de développer plus en détail, peut donc être utilisée pour l'optimisation des systèmes énergétiques hybrides où au lieu de la hauteur du canal *H*, comme dans le présent cas d'étude, peut aussi déterminer par exemple le débit massique optimal ou la vitesse optimale du fluide circulant dans ces systèmes.

Conclusion :

Une nouvelle méthode de détermination de la hauteur optimale du canal de section droite rectangulaire est proposée. Elle utilise la variation de la différence (η_{tot}(%)−ε_{tot} (%)) en fonction de la hauteur du canal de refroidissement *H*; c'est-à-dire, la différence entre l'efficacité énergétique et l'efficacité exergétique du (PVT) en fonction de *H*. L'équation obtenue correspondant au meilleur lissage des points est un polynôme de 3eme ordre avec un coefficient de corrélation R^2 égale à 1. Cette courbe a donc un point d'inflexion dont la valeur déterminera précisément la hauteur optimale du canal rectangulaire du collecteur hybride (PVT).

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale :

Les conclusions les plus pertinentes tirées du travail de cette thèse de doctorat, et qui concernent deux types de collecteurs solaire hybrides photovoltaïque/thermique (PV/T) se résument comme suite ;

Pour le (PVT) à base d'eau :

1) Basée sur la première et la deuxième lois de la thermodynamique, une analyse de l'efficacité globale d'un nouveau collecteur solaire hybride (PV/T) à base d'eau est réalisée, et les résultats ont été comparés à ceux de Nahar *et al.*, principalement car jusqu'à présent, leur collecteur (PV/T) hybride mono-canal sans plaque absorbante et tubes a donné le rendement énergétique le plus élevé.

2) Les simulations portent sur les impacts des paramètres intrinsèques (le hauteur du canal de refroidissement et la vitesse d'entrée de l'eau) et extrinsèques (vitesse du vent, rayonnement solaire et température) sur les performances énergétiques et exergétiques globales du nouveau (PV/T).

3) Dans tous les cas, on peut remarquer que l'efficacité énergétique globale η_{pvt} et l'efficacité exergétique ε_{pvt}du nouveau (PV/T) sont supérieurs à celles de Nahar *et a*l.; cela montre qu'en termes de '*quantité*' et '*qualité*' d'énergie, le nouveau (PV/T) proposé dans la présente étude lui est supérieur.

4) Pour les paramètres extrinsèques, le rayonnement solaire est un facteur favorable pour l'efficacité exergétique, tandis que l'efficacité énergétique reste inchangée. D'un autre côté, la température ambiante comme prévu a un impact négatif sur l'efficacité exergétique et n'a pas d'impact sur l'efficacité énergétique.

5) La vitesse d'entrée de l'eau de refroidissement semble être un facteur favorable pour l'efficacité énergétique et défavorable pour l'efficacité exergétique. Par ailleurs, l'étude montre aussi que pour le nouveau (PV/T), le problème de surchauffe n'existe pas ; peu importe l'emplacement dans la cellule PV ; la température est inférieure à 68 °C, alors qu'elle peut atteindre les 126 °C pour le (PV/T) de Nahar et al.

6) La vitesse du vent n'a pratiquement aucun impact sur le nouveau (PV/T) proposé ; η_{pvt} et ε_{pvt} restent inchangés. Ce n'est pas le cas pour le collecteur solaire hybride (PV/T) à plaque et tubes, où il s'avère que le vent impacte négativement leur efficacité énergétique η_{pvt}.

7) Enfin, tous ces résultats montrant une certaine supériorité de ce nouveau collecteur hybride (PV/T) avec canal par rapport aux (PV/T) qui existent actuellement, ceci grâce à la superposition de l'eau s'écoulant dans un canal au-dessus du module photovoltaïque. Cette modification crée un filtre naturel absorbant le rayonnement IR tout en laissant le rayonnement visible de passer vers cellules PV. De plus, la forme géométrique rectangulaire du canal de refroidissement a permis un refroidissement sur l'ensemble de la surface du PV. Ce fait est confirmé tout récemment dans les recherches de Maria

Herrando *et al*. qui ont trouvé que tous les collecteurs plats avec canaux testés ont des rendements supérieurs que ceux des (PV/T) type plaques et tubes (S&T).

Pour le (PVT) à base de nanofluide eau-TiO_2 :

8) Un taux de refroidissement très important des cellules photovoltaïques est obtenu dans le cas du (PV/T) avec un canal par rapport à celui avec plaque-et-tubes (S&T). En effet, si la température moyenne journalière de surface du module PV seul est approximativement égale à 64,6°C, une diminution de sa température de 19,4 °C pour le (PV/T) avec canal (H = 3-cm) est obtenue, alors qu'elle est de 11,48 °C pour le type (S&T).

9) Les performances selon la première et seconde loi de la thermodynamique des deux collecteurs hybrides (PV/T) à base d'eau et de nanofluide eau-TiO_2 sont très différentes. Le (PV/T) de Sardarabadi *et al*. [238, 239] (S&T) a un meilleur rendement thermique de 44,34% (37,51% pour le type à canal), cependant, son exergie globale ε_{tot}est plus faible. Par ailleurs, pour l'eau le (PV/T) avec canal de refroidissement est supérieur à celui du type (S&T) de [238, 239] avec 35,87% et 34,12% pour le type de canal et le type (S&T), respectivement.

10) Le collecteur hybride (PV/T) à base de nanofluide eau-TiO_2 avec un canal de refroidissement n'a qu'un faible avantage d'efficacité énergétique par rapport au (PV/T) à base d'eau (PV/T). Du point de vue exergétique, en revanche, le (PV/T) à base d'eau est meilleur (même comparé au nanofluide avec une fraction massique élevée de 4,127%).

11) Le collecteur hybride (PV/T) à base de nanofluide eau-TiO_2 ne présente aucun avantage substantiel par rapport au collecteur à base d'eau (PV/T).

12) Contrairement à [238, 239], la présente étude montre qu'une augmentation des rendements énergétiques reste modérée pour le (PV/T) à base de nanofluide TiO_2-eau lorsque la fraction massique est faible.

Pour les deux (PV/T)

Une nouvelle méthode de détermination de la hauteur optimale du canal de refroidissement est proposée. L'étude de la hauteur du canal de refroidissement a fait jaillir les '*effets en compétition* de η_{pvt}. et ε_{pvt}'. Cela conduit à un optimum géométrique, qui est proposé dans cette étude comme le point d'inflexion de la courbe ($\eta-\varepsilon$) en fonction de H. Pour le cas de l'eau, on trouve une hauteur approximativement égale à 3,6 cm, ce qui est similaire à celle expérimentalement déterminée par Al-Shohani*et al*. Elle est validée en outre par comparaison avec l'équation de Bejan.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Bisquert, J., Cahen, D., Hodes, G., Rühle, S., & Zaban, A., *Physical chemical principles of photovoltaic conversion with nanoparticulate, mesoporous dye-sensitized solar cells.*The Journal of Physical Chemistry B., 2004: p. 108(24), 8106-8118.

2. Bisquert, J., et al., *Physical chemical principles of photovoltaic conversion with nanoparticulate, mesoporous dye-sensitized solar cells.* The Journal of Physical Chemistry B, 2004. **108**(24): p. 8106-8118.

3. Dubey, S., J.N. Sarvaiya, and B. Seshadri, *Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world–a review.* Energy Procedia, 2013. **33**: p. 311-321.

4. Skoplaki, E., A. Boudouvis, and J. Palyvos, *A simple correlation for the operating temperature of photovoltaic modules of arbitrary mounting.* Solar energy materials and solar cells, 2008. **92**(11): p. 1393-1402.

5. Vaka, M., et al., *A review: Emphasizing the nanofluids use in PV/T systems.* IEEE Access, 2019. **8**: p. 58227-58249.

6. Heimsath, A., et al., *Concentrating solar collectors for process heat and electricity generation.* FVEE. AEE, 2009: p. 61-65.

7. Teske, S., et al., *Solar thermal electricity: Global outlook 2016.* European Solar Thermal Electricity Association, 2016.

8. Riffat, S., X. Zhao, and P. Doherty, *Developing a theoretical model to investigate thermal performance of a thin membrane heat-pipe solar collector.* Applied Thermal Engineering, 2005. **25**(5-6): p. 899-915.

9. van Helden, W.G., R.J.C. van Zolingen, and H.A. Zondag, *PV thermal systems: PV panels supplying renewable electricity and heat.* Progress in photovoltaics: research and applications, 2004. **12**(6): p. 415-426.

10. Fraisse, G., C. Ménézo, and K. Johannes, *Energy performance of water hybrid PV/T collectors applied to combisystems of Direct Solar Floor type.* Solar Energy, 2007. **81**(11): p. 1426-1438.

11. Wolf, M., *Performance analyses of combined heating and photovoltaic power systems for residences.* Energy Conversion, 1976. **16**(1-2): p. 79-90.

12. Florschuetz, L., *Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors.* Solar energy, 1979. **22**(4): p. 361-366.

13. Kern Jr, E. and M. Russell, *Combined photovoltaic and thermal hybrid collector systems*. 1978, Massachusetts Inst. of Tech., Lexington (USA). Lincoln Lab.

14. Hendrie, S.D., *Evaluation of combined photovoltaic/thermal collectors*. 1979, Massachusetts Inst. of Tech., Lexington (USA). Lincoln Lab.

15. Tyagi, V., S. Kaushik, and S. Tyagi, *Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012. **16**(3): p. 1383-1398.

16. Alfegi, E.M., et al., *Mathematical model of double pass photovoltaic thermal air collector with fins.* American Journal of Environmental Sciences, 2009. **5**(5): p. 592.

17. Tiwari, A. and M. Sodha, *Parametric study of various configurations of hybrid PV/thermal air collector: experimental validation of theoretical model.* Solar Energy Materials and Solar Cells, 2007. **91**(1): p. 17-28.

18. Tonui, J. and Y. Tripanagnostopoulos, *Performance improvement of PV/T solar collectors with natural air flow operation.* Solar energy, 2008. **82**(1): p. 1-12.

19. Kumar, R. and M.A. Rosen, *A critical review of photovoltaic–thermal solar collectors for air heating.* Applied Energy, 2011. **88**(11): p. 3603-3614.

20. Bambrook, S. and A. Sproul, *Maximising the energy output of a PVT air system.* Solar Energy, 2012. **86**(6): p. 1857-1871.

21. Sarhaddi, F., et al., *An improved thermal and electrical model for a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector.* Applied energy, 2010. **87**(7): p. 2328-2339.

22. Kamthania, D., S. Nayak, and G. Tiwari, *Performance evaluation of a hybrid photovoltaic thermal double pass facade for space heating.* Energy and Buildings, 2011. **43**(9): p. 2274-2281.

23. Othman, M.Y., et al., *Performance studies on a finned double-pass photovoltaic-thermal (PV/T) solar collector.* Desalination, 2007. **209**(1-3): p. 43-49.

24. Dupeyrat, P., et al., *Efficient single glazed flat plate photovoltaic–thermal hybrid collector for domestic hot water system.* Solar Energy, 2011. **85**(7): p. 1457-1468.

25. Chow, T.T., et al., *Energy and exergy analysis of photovoltaic–thermal collector with and without glass cover.* Applied Energy, 2009. **86**(3): p. 310-316.

26. Dubey, S. and G. Tiwari, *Analysis of PV/T flat plate water collectors connected in series.* Solar Energy, 2009. **83**(9): p. 1485-1498.

27. Tiwari, A., et al., *Exergy analysis of integrated photovoltaic thermal solar water heater under constant flow rate and constant collection temperature modes.* Applied Energy, 2009. **86**(12): p. 2592-2597.

28. Sakhr, M., E. Ervina, and A. Saqaff, *Theoretical study of new configuration of PVT system design.* J. Adv. Mater. Res, 2013. **772**: p. 681-687.

29. Sakhr, M.S., M. Fadhel, and S. Alkaff, *Performance analysis of the photovoltaic/thermal solar collector for different Malaysian climatic condition.* Journal of Applied Mechanics and Materials, 2014. **467**: p. 522-527.

30. Hazi, A., et al., *Opportunity to use PVT systems for water heating in industry.* Applied thermal engineering, 2014. **63**(1): p. 151-157.

31. Bilbao, J. and A. Sproul, *Detailed PVT-water model for transient analysis using RC networks.* Solar Energy, 2015. **115**: p. 680-693.

32. Chow, T.T., *A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology.* Applied energy, 2010. **87**(2): p. 365-379.

33. Rosa-Clot, M., P. Rosa-Clot, and G. Tina, *TESPI: thermal electric solar panel integration.* Solar Energy, 2011. **85**(10): p. 2433-2442.

34. Taylor, R.A., T. Otanicar, and G. Rosengarten, *Nanofluid-based optical filter optimization for PV/T systems.* Light: Science & Applications, 2012. **1**(10): p. e34-e34.

35. Rosa-Clot, M., et al., *Submerged photovoltaic solar panel: SP2.* Renewable Energy, 2010. **35**(8): p. 1862-1865.

36. Lanzafame, R., et al., *Field experience with performances evaluation of a single-crystalline photovoltaic panel in an underwater environment.* IEEE transactions on industrial electronics, 2009. **57**(7): p. 2492-2498.

37. Shockley, W. and H.J. Queisser, *Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells.* Journal of applied physics, 1961. **32**(3): p. 510-519.

38. Skoplaki, E. and J.A. Palyvos, *Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations.* Renewable energy, 2009. **34**(1): p. 23-29.

39. Joshi, A.S., I. Dincer, and B.V. Reddy, *Performance analysis of photovoltaic systems: a review.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009. **13**(8): p. 1884-1897.

40. Farzanehnia, A. and M. Sardarabadi, *Exergy in Photovoltaic/Thermal Nanofluid-Based Collector Systems*, in *Exergy and Its Application-Toward Green Energy Production and Sustainable Environment*. 2019, IntechOpen.

41. Petela, R., *Exergy of heat radiation.* 1964.

42. Spanner, D.C., *Introduction to thermodynamics.* Introduction to thermodynamics., 1964.

43. Jeter, S.M., *Maximum conversion efficiency for the utilization of direct solar radiation.* Solar energy, 1981. **26**(3): p. 231-236.

44. Nahar, A., M. Hasanuzzaman, and N. Rahim, *Numerical and experimental investigation on the performance of a photovoltaic thermal collector with parallel plate flow channel under different operating conditions in Malaysia.* solar energy, 2017. **144**: p. 517-528.

45. Widyolar, B., et al., *Experimental performance of an ultra-low-cost solar photovoltaic-thermal (PVT) collector using aluminum minichannels and nonimaging optics.* Applied Energy, 2020. **268**: p. 114894.

46. Zondag, H.A., et al., *The thermal and electrical yield of a PV-thermal collector.* Solar energy, 2002. **72**(2): p. 113-128.

47. Savino, J.M. and R. Siegel, *Laminar forced convection in rectangular channels with unequal heat addition on adjacent sides.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 1964. **7**(7): p. 733-741.

48. Delfani, S., M. Karami, and M. Akhavan-Behabadi, *Performance characteristics of a residential-type direct absorption solar collector using MWCNT nanofluid*, in *Renewable Energy*. 2016. p. 754-764.

49. Duffie, J.A. and W.A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*. 2013: John Wiley & Sons.

50. Guarracino, I., et al., *Dynamic coupled thermal-and-electrical modelling of sheet-and-tube hybrid photovoltaic/thermal (PVT) collectors.* Applied Thermal Engineering, 2016. **101**: p. 778-795.

51. Hale, G.M. and M.R. Querry, *Optical constants of water in the 200-nm to 200-μm wavelength region.* Applied optics, 1973. **12**(3): p. 555-563.

52. Oliveira, L.R., et al., *Thermophysical properties of TiO2-PVA/water nanofluids.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017. **115**: p. 795-808.

53. Eastman, J.A., et al., *Thermal transport in nanofluids.*Annu. Rev. Mater. Res., 2004. **34**: p. 219-246.

54. Chang, H. and S.-C. Lin, *Fabrication method for a TiO2 nanofluid with high roundness and superior dispersion properties.* Materials Transactions, 2007. **48**(4): p. 836-841.

55. Said, Z., et al., *New thermophysical properties of water based TiO2 nanofluid—The hysteresis phenomenon revisited.* International communications in heat and mass transfer, 2014. **58**: p. 85-95.

56. Hamid, K.A., et al., *Experimental investigation of thermal conductivity and dynamic viscosity on nanoparticle mixture ratios of TiO2-SiO2 nanofluids.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018. **116**: p. 1143-1152.

57. Duangthongsuk, W. and S. Wongwises, *Comparison of the effects of measured and computed thermophysical properties of nanofluids on heat transfer performance.* Experimental Thermal and Fluid Science, 2010. **34**(5): p. 616-624.

58. Karami, N. and M. Rahimi, *Heat transfer enhancement in a PV cell using Boehmite nanofluid.* Energy conversion and management, 2014. **86**: p. 275-285.

59. Otanicar, T.P., et al., *Nanofluid-based direct absorption solar collector.* Journal of renewable and sustainable energy, 2010. **2**(3): p. 033102.

60. Tyagi, H., P. Phelan, and R. Prasher, *Predicted efficiency of a low-temperature nanofluid-based direct absorption solar collector.* Journal of solar energy engineering, 2009. **131**(4).

61. Ding, Y., et al., *Heat transfer intensification using nanofluids.* KONA Powder and Particle Journal, 2007. **25**: p. 23-38.

62. Gangwar, J., et al., *NiO-based nanostructures with efficient optical and electrochemical properties for high-performance nanofluids.* Nanotechnology, 2013. **24**(41): p. 415705.

63. Al-Waeli, A.H., et al., *An experimental investigation of SiC nanofluid as a base-fluid for a photovoltaic thermal PV/T system.* Energy Conversion and Management, 2017. **142**: p. 547-558.

64. Abdallah, S.R., et al., *Experimental investigation on the effect of using nano fluid (Al2O3-Water) on the performance of PV/T system.* Thermal Science and Engineering Progress, 2018. **7**: p. 1-7.

65. Ghadiri, M., et al., *Experimental investigation of a PVT system performance using nano ferrofluids.* Energy Conversion and Management, 2015. **103**: p. 468-476.

66. Manikandan, S. and K. Rajan, *Sand-propylene glycol-water nanofluids for improved solar energy collection.* Energy, 2016. **113**: p. 917-929.

67. An, W., et al., *Experimental investigation of a concentrating PV/T collector with Cu9S5 nanofluid spectral splitting filter.* Applied energy, 2016. **184**: p. 197-206.

68. Sangeetha, M., et al., *Progress of MWCNT, Al2O3, and CuO with water in enhancing the photovoltaic thermal system.* International Journal of Energy Research, 2020. **44**(2): p. 821-832.

69. Hassan, A., et al., *Thermal management and uniform temperature regulation of photovoltaic modules using hybrid phase change materials-nanofluids system.* Renewable Energy, 2020. **145**: p. 282-293.

70. Xu, Z. and C. Kleinstreuer, *Computational analysis of nanofluid cooling of high concentration photovoltaic cells.* Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2014. **6**(3).

71. Elmir, M., R. Mehdaoui, and A. Mojtabi, *Numerical simulation of cooling a solar cell by forced convection in the presence of a nanofluid.* Energy Procedia, 2012. **18**: p. 594-603.

72. Khanjari, Y., F. Pourfayaz, and A. Kasaeian, *Numerical investigation on using of nanofluid in a water-cooled photovoltaic thermal system.* Energy Conversion and Management, 2016. **122**: p. 263-278.

73. Hosseinzadeh, M., et al., *Optimization and parametric analysis of a nanofluid based photovoltaic thermal system: 3D numerical model with experimental validation.* Energy Conversion and Management, 2018. **160**: p. 93-108.

74. Soliman, A.M. and H. Hassan, *Effect of heat spreader size, microchannel configuration and nanoparticles on the performance of PV-heat spreader-microchannels system.* Solar Energy, 2019. **182**: p. 286-297.

75. Jia, Y., et al., *Numerical analysis of photovoltaic-thermal collector using nanofluid as a coolant.* Solar Energy, 2020. **196**: p. 625-636.

76. Leong, K.Y. and W. Azmi, *Nanofluids Containing Titanium Dioxide: Thermo-Physical Properties and Energy Saving Applications.* Handbook of Ecomaterials; Martínez, LMT, Kharissova, OV, Kharisov, BI, Eds, 2017: p. 1-20.

77. Rajagopalan, R. and P.C. Hiemenz, *Principles of colloid and surface chemistry.* Marcel Dekker, New-York, 1997. **8247**: p. 8.

78. Li, X., D. Zhu, and X. Wang, *Evaluation on dispersion behavior of the aqueous copper nano-suspensions.* Journal of colloid and interface science, 2007. **310**(2): p. 456-463.

79. Kong, L., J. Sun, and Y. Bao, *Preparation, characterization and tribological mechanism of nanofluids.* Rsc Advances, 2017. **7**(21): p. 12599-12609.

80. Ghadimi, A., R. Saidur, and H. Metselaar, *A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions.* International journal of heat and mass transfer, 2011. **54**(17-18): p. 4051-4068.

81. Haghighi, E., et al., *Shelf stability of nanofluids and its effect on thermal conductivity and viscosity.* Measurement Science and Technology, 2013. **24**(10): p. 105301.

82. Yu, W., et al., *Review and assessment of nanofluid technology for transportation and other applications.* 2007.

83. Chang, H., et al., *Nanoparticle suspension preparation using the arc spray nanoparticle synthesis system combined with ultrasonic vibration and rotating electrode.* The international journal of advanced manufacturing technology, 2005. **26**(5-6): p. 552-558.

84. Das, P.K., et al., *Synthesis and characterization of TiO2–water nanofluids with different surfactants.* International Communications in Heat and Mass Transfer, 2016. **75**: p. 341-348.

85. Zhelezny, V., et al., *A complex investigation of the nanofluids R600a-mineral oil-AL2O3 and R600a-mineral oil-TiO2. Thermophysical properties.* International journal of refrigeration, 2017. **74**: p. 488-504.

86. Chakraborty, S., et al., *Experimental investigation on the effect of dispersant addition on thermal and rheological characteristics of TiO2 nanofluid.* Powder Technology, 2017. **307**: p. 10-24.

87. Xia, G., et al., *The characteristics of convective heat transfer in microchannel heat sinks using Al2O3 and TiO2 nanofluids.* International Communications in Heat and Mass Transfer, 2016. **76**: p. 256-264.

88. Bobbo, S., et al., *Viscosity of water based SWCNH and TiO2 nanofluids.* Experimental Thermal and Fluid Science, 2012. **36**: p. 65-71.

89. Suganthi, K. and K. Rajan, *Metal oxide nanofluids: Review of formulation, thermo-physical properties, mechanisms, and heat transfer performance.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **76**: p. 226-255.

90. Alim, M.A., et al., *Analyses of entropy generation and pressure drop for a conventional flat plate solar collector using different types of metal oxide nanofluids.* Energy and Buildings, 2013. **66**: p. 289-296.

91. Chaji, H., et al., *Experimental study on thermal efficiency of flat plate solar collector using TiO2/water nanofluid.* Modern Applied Science, 2013. **7**(10): p. 60-69.

92. Mahian, O., et al., *Performance analysis of a minichannel-based solar collector using different nanofluids.* Energy conversion and management, 2014. **88**: p. 129-138.

93. Said, Z., et al., *Performance enhancement of a flat plate solar collector using titanium dioxide nanofluid and polyethylene glycol dispersant.* Journal of Cleaner Production, 2015. **92**: p. 343-353.

94. Ebrahimnia-Bajestan, E., et al., *Experimental and numerical investigation of nanofluids heat transfer characteristics for application in solar heat exchangers.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016. **92**: p. 1041-1052.

95. Verma, S.K., A.K. Tiwari, and D.S. Chauhan, *Experimental evaluation of flat plate solar collector using nanofluids.* Energy conversion and Management, 2017. **134**: p. 103-115.

96. Farajzadeh, E., S. Movahed, and R. Hosseini, *Experimental and numerical investigations on the effect of Al2O3/TiO2H2O nanofluids on thermal efficiency of the flat plate solar collector.* Renewable Energy, 2018. **118**: p. 122-130.

97. Kiliç, F., T. Menlik, and A. Sözen, *Effect of titanium dioxide/water nanofluid use on thermal performance of the flat plate solar collector.* Solar Energy, 2018. **164**: p. 101-108.

98. Farhana, K., et al. *CFD modelling of different properties of nanofluids in header and riser tube of flat plate solar collector*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. IOP Publishing.

99. Keblinski, P., J.A. Eastman, and D.G. Cahill, *Nanofluids for thermal transport.* Materials today, 2005. **8**(6): p. 36-44.

100. Chen, L. and H. Xie, *Silicon oil based multiwalled carbon nanotubes nanofluid with optimized thermal conductivity enhancement.* Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2009. **352**(1-3): p. 136-140.

101. Wei, X., et al., *Synthesis and thermal conductivity of Cu2O nanofluids.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009. **52**(19-20): p. 4371-4374.

102. Yu, W., et al., *Enhancement of thermal conductivity of kerosene-based Fe3O4 nanofluids prepared via phase-transfer method.* Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects, 2010. **355**(1-3): p. 109-113.

103. Murshed, S., K. Leong, and C. Yang, *Enhanced thermal conductivity of TiO2—water based nanofluids.* International Journal of thermal sciences, 2005. **44**(4): p. 367-373.

104. Duangthongsuk, W. and S. Wongwises, *Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO2-water nanofluids.* Experimental thermal and fluid science, 2009. **33**(4): p. 706-714.

105. Buongiorno, J., et al., *A benchmark study on the thermal conductivity of nanofluids.* Journal of Applied Physics, 2009. **106**(9): p. 094312.

106. Maxwell, J.C., *A treatise on electricity and magnetism*. Vol. 1. 1881: Clarendon press.

107. Zhu, D., et al., *Dispersion behavior and thermal conductivity characteristics of Al2O3–H2O nanofluids.* Current Applied Physics, 2009. **9**(1): p. 131-139.

108. Teng, T.-P., et al., *The effect of alumina/water nanofluid particle size on thermal conductivity.* Applied Thermal Engineering, 2010. **30**(14-15): p. 2213-2218.

109. Chandrasekar, M., S. Suresh, and A.C. Bose, *Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al2O3/water nanofluid.* Experimental Thermal and Fluid Science, 2010. **34**(2): p. 210-216.

110. Suresh, S., et al., *Synthesis of Al2O3–Cu/water hybrid nanofluids using two step method and its thermo physical properties.* Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2011. **388**(1-3): p. 41-48.

111. Li, X., et al., *Thermal conductivity enhancement dependent pH and chemical surfactant for Cu-H2O nanofluids.* Thermochimica Acta, 2008. **469**(1-2): p. 98-103.

112. Nasiri, A., et al., *Effect of CNT structures on thermal conductivity and stability of nanofluid.* International Journal of heat and Mass transfer, 2012. **55**(5-6): p. 1529-1535.

113. Sundar, L.S., M.K. Singh, and A.C. Sousa, *Investigation of thermal conductivity and viscosity of Fe3O4 nanofluid for heat transfer applications.* International communications in heat and mass transfer, 2013. **44**: p. 7-14.

114. Cuenca, Y., et al., *Thermal conductivity of ammonia+ water mixtures over a wide range of concentrations.* International journal of refrigeration, 2013. **36**(3): p. 998-1003.

115. Yeganeh, M., et al., *Volume fraction and temperature variations of the effective thermal conductivity of nanodiamond fluids in deionized water.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010. **53**(15-16): p. 3186-3192.

116. Gandhi, K.S.K., et al., *Measurement of thermal and electrical conductivities of graphene nanofluids.* 2011.

117. Jiang, H., et al., *Effective thermal conductivity of nanofluids Considering interfacial nano-shells.* Materials Chemistry and Physics, 2014. **148**(1-2): p. 195-200.

118. Hajjar, Z., A. morad Rashidi, and A. Ghozatloo, *Enhanced thermal conductivities of graphene oxide nanofluids.* International Communications in Heat and Mass Transfer, 2014. **57**: p. 128-131.

119. Esfe, M.H., S. Saedodin, and M. Mahmoodi, *Experimental studies on the convective heat transfer performance and thermophysical properties of MgO–water nanofluid under turbulent flow.* Experimental thermal and fluid science, 2014. **52**: p. 68-78.

120. Esfe, M.H., et al., *Thermophysical properties, heat transfer and pressure drop of COOH-functionalized multi walled carbon nanotubes/water nanofluids.* International Communications in Heat and Mass Transfer, 2014. **58**: p. 176-183.

121. Megatif, L., et al., *Investigation of laminar convective heat transfer of a novel TiO2–carbon nanotube hybrid water-based nanofluid.* Experimental Heat Transfer, 2016. **29**(1): p. 124-138.

122. Liu, M.-S., et al., *Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids.* International communications in heat and mass transfer, 2005. **32**(9): p. 1202-1210.

123. Yu, W., et al., *Investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluid.* Thermochimica Acta, 2009. **491**(1-2): p. 92-96.

124. Paul, G., et al., *Synthesis, characterization, and thermal property measurement of nano-Al95Zn05 dispersed nanofluid prepared by a two-step process.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011. **54**(15-16): p. 3783-3788.

125. Yu, W., et al., *Significant thermal conductivity enhancement for nanofluids containing graphene nanosheets.* Physics Letters A, 2011. **375**(10): p. 1323-1328.

126. Yu, W., et al., *Experimental investigation on thermal conductivity and viscosity of aluminum nitride nanofluid.* Particuology, 2011. **9**(2): p. 187-191.

127. Hwang, Y., et al., *Investigation on characteristics of thermal conductivity enhancement of nanofluids.* Current Applied Physics, 2006. **6**(6): p. 1068-1071.

128. Chopkar, M., et al., *Development and characterization of Al2Cu and Ag2Al nanoparticle dispersed water and ethylene glycol based nanofluid.* Materials Science and Engineering: B, 2007. **139**(2-3): p. 141-148.

129. Vajjha, R.S. and D.K. Das, *Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009. **52**(21-22): p. 4675-4682.

130. Reddy, M.C.S. and V.V. Rao, *Experimental studies on thermal conductivity of blends of ethylene glycol-water-based TiO2 nanofluids.* International Communications in Heat and Mass Transfer, 2013. **46**: p. 31-36.

131. Sahooli, M. and S. Sabbaghi, *Investigation of thermal properties of CuO nanoparticles on the ethylene glycol–water mixture.* Materials Letters, 2013. **93**: p. 254-257.

132. Moosavi, M., E.K. Goharshadi, and A. Youssefi, *Fabrication, characterization, and measurement of some physicochemical properties of ZnO nanofluids.* International journal of heat and fluid flow, 2010. **31**(4): p. 599-605.

133. Nikkam, N., et al., *Experimental investigation on thermo-physical properties of copper/diethylene glycol nanofluids fabricated via microwave-assisted route.* Applied Thermal Engineering, 2014. **65**(1-2): p. 158-165.

134. Nikkam, N., et al., *Experimental study on preparation and base liquid effect on thermo-physical and heat transport characteristics of α-SiC nanofluids.* International Communications in Heat and Mass Transfer, 2014. **55**: p. 38-44.

135. Suganthi, K., V.L. Vinodhan, and K. Rajan, *Heat transfer performance and transport properties of ZnO–ethylene glycol and ZnO–ethylene glycol–water nanofluid coolants.* Applied energy, 2014. **135**: p. 548-559.

136. Elias, M., et al., *Experimental investigation on the thermo-physical properties of Al2O3 nanoparticles suspended in car radiator coolant.* International Communications in Heat and Mass Transfer, 2014. **54**: p. 48-53.

137. Sundar, L.S., et al., *Thermal conductivity and viscosity of stabilized ethylene glycol and water mixture Al2O3 nanofluids for heat transfer applications: An experimental study.* International Communications in Heat and Mass Transfer, 2014. **56**: p. 86-95.

138. Kole, M. and T. Dey, *Role of interfacial layer and clustering on the effective thermal conductivity of CuO–gear oil nanofluids.* Experimental thermal and fluid science, 2011. **35**(7): p. 1490-1495.

139. Saeedinia, M., M. Akhavan-Behabadi, and P. Razi, *Thermal and rheological characteristics of CuO–Base oil nanofluid flow inside a circular tube.* International Communications in Heat and Mass Transfer, 2012. **39**(1): p. 152-159.

140. Kole, M. and T. Dey, *Enhanced thermophysical properties of copper nanoparticles dispersed in gear oil.* Applied thermal engineering, 2013. **56**(1-2): p. 45-53.

141. Wang, B., et al., *Thermal conductivity and rheological properties of graphite/oil nanofluids.* Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2012. **414**: p. 125-131.

142. Zhang, Q., et al., *Thermal conductivity of multiwalled carbon nanotubes.* Physical Review B, 2002. **66**(16): p. 165440.

143. Samani, M., et al., *Thermal conductivity of individual multiwalled carbon nanotubes.* International Journal of Thermal Sciences, 2012. **62**: p. 40-43.

144. Khedkar, R.S., et al., *Thermo–physical characterization of paraffin based Fe3O4 nanofluids.* Procedia Engineering, 2013. **51**: p. 342-346.

145. Mahbubul, I., R. Saidur, and M. Amalina, *Thermal conductivity, viscosity and density of R141b refrigerant based nanofluid.* Procedia Engineering, 2013. **56**: p. 310-315.

146. Mostafizur, R., et al., *Thermal conductivity variation for methanol based nanofluids.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014. **76**: p. 350-356.

147. Alawi, O.A. and N.A.C. Sidik, *Influence of particle concentration and temperature on the thermophysical properties of CuO/R134a nanorefrigerant.* International Communications in Heat and Mass Transfer, 2014. **58**: p. 79-84.

148. Abdolbaqi, M.K., et al., *An experimental determination of thermal conductivity and viscosity of BioGlycol/water based TiO2 nanofluids.* International Communications in Heat and Mass Transfer, 2016. **77**: p. 22-32.

149. Kumar, M.S., V. Vasu, and A.V. Gopal, *Thermal conductivity and rheological studies for Cu–Zn hybrid nanofluids with various basefluids.* Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2016. **66**: p. 321-327.

150. Satti, J.R., D.K. Das, and D. Ray, *Investigation of the thermal conductivity of propylene glycol nanofluids and comparison with correlations.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017. **107**: p. 871-881.

151. Chen, W., et al., *Experimental investigation of SiC nanofluids for solar distillation system: Stability, optical properties and thermal conductivity with saline water-based fluid.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017. **107**: p. 264-270.

152. Wei, B., C. Zou, and X. Li, *Experimental investigation on stability and thermal conductivity of diathermic oil based TiO2 nanofluids.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017. **104**: p. 537-543.

153. Pastoriza-Gallego, M., et al., *Thermophysical profile of ethylene glycol-based ZnO nanofluids.* The Journal of Chemical Thermodynamics, 2014. **73**: p. 23-30.

154. Ganesh Ranakoti, I., et al., *Heat transfer enhancement by nano fluids.* ME642-Convective heat and mass transfer, 2012.

155. Paul, G., T. Pal, and I. Manna, *Thermo-physical property measurement of nano-gold dispersed water based nanofluids prepared by chemical precipitation technique.* Journal of colloid and interface science, 2010. **349**(1): p. 434-437.

156. Xie, H.-q., et al., *Thermal conductivity of suspensions containing nanosized SiC particles.* International Journal of Thermophysics, 2002. **23**(2): p. 571-580.

157. Murshed, S., K. Leong, and C. Yang, *Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids.* International Journal of Thermal Sciences, 2008. **47**(5): p. 560-568.

158. Ding, Y., et al., *Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids).* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006. **49**(1-2): p. 240-250.

159. Manikandan, S., A. Shylaja, and K. Rajan, *Thermo-physical properties of engineered dispersions of nano-sand in propylene glycol.* Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2014. **449**: p. 8-18.

160. Eastman, J.A., et al., *Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles.* Applied physics letters, 2001. **78**(6): p. 718-720.

161. Keblinski, P., et al., *Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids).* International journal of heat and mass transfer, 2002. **45**(4): p. 855-863.

162. Hong, K., T.-K. Hong, and H.-S. Yang, *Thermal conductivity of Fe nanofluids depending on the cluster size of nanoparticles.* Applied Physics Letters, 2006. **88**(3): p. 031901.

163. Zhu, H., et al., *Effects of nanoparticle clustering and alignment on thermal conductivities of Fe 3 O 4 aqueous nanofluids.* Applied Physics Letters, 2006. **89**(2): p. 023123.

164. Hamilton, R.L. and O. Crosser, *Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems.* Industrial & Engineering chemistry fundamentals, 1962. **1**(3): p. 187-191.

165. Maxwell, J.C., *A treatise on electricity and magnetism*. Vol. 1. 1873: Oxford: Clarendon Press.

166. Nan, C.-W., et al., *Effective thermal conductivity of particulate composites with interfacial thermal resistance.* Journal of Applied Physics, 1997. **81**(10): p. 6692-6699.

167. Bruggeman, v.D., *Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. III. Die elastischen Konstanten der quasiisotropen Mischkörper aus isotropen Substanzen.*Annalen der Physik, 1937. **421**(2): p. 160-178.

168. Wasp, E.J., R.L. Gandhi, and J.P. Kenny, *Solid-liquid flow*. 1977, Trans Tech Publ.

169. Xie, H., M. Fujii, and X. Zhang, *Effect of interfacial nanolayer on the effective thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005. **48**(14): p. 2926-2932.

170. Fedele, L., L. Colla, and S. Bobbo, *Viscosity and thermal conductivity measurements of water-based nanofluids containing titanium oxide nanoparticles.* International journal of refrigeration, 2012. **35**(5): p. 1359-1366.

171. Islam, M.R., B. Shabani, and G. Rosengarten, *Electrical and thermal conductivities of 50/50 water-ethylene glycol based TiO2 nanofluids to be used as coolants in PEM fuel cells.* Energy Procedia, 2017. **110**: p. 101-108.

172. Lee, J. and I. Mudawar, *Assessment of the effectiveness of nanofluids for single-phase and two-phase heat transfer in micro-channels.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007. **50**(3-4): p. 452-463.

173. Corcione, M., *Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids.* Energy conversion and management, 2011. **52**(1): p. 789-793.

174. Sharma, K., et al., *Correlations to predict friction and forced convection heat transfer coefficients of water based nanofluids for turbulent flow in a tube.* International Journal of Microscale and Nanoscale Thermal and Fluid Transport Phenomena, 2012. **3**(4): p. 1-25.

175. Nguyen, C., et al., *Viscosity data for Al2O3–water nanofluid—hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable?* International journal of thermal sciences, 2008. **47**(2): p. 103-111.

176. Arefmanesh, A. and M. Mahmoodi, *Effects of uncertainties of viscosity models for Al2O3–water nanofluid on mixed convection numerical simulations.* International journal of Thermal sciences, 2011. **50**(9): p. 1706-1719.

177. Aladag, B., et al., *Experimental investigations of the viscosity of nanofluids at low temperatures.* Applied energy, 2012. **97**: p. 876-880.

178. Mena, J.B., et al., *Extrapolation of Al2O3–water nanofluid viscosity for temperatures and volume concentrations beyond the range of validity of existing correlations.* Applied thermal engineering, 2013. **51**(1-2): p. 1092-1097.

179. Hung, Y.-H. and W.-C. Chou, *Chitosan for suspension performance and viscosity of MWCNTs.* International Journal of Chemical Engineering and Applications, 2012. **3**(5): p. 347.

180. Suganthi, K. and K. Rajan, *Temperature induced changes in ZnO–water nanofluid: zeta potential, size distribution and viscosity profiles.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012. **55**(25-26): p. 7969-7980.

181. Halelfadl, S., et al., *Viscosity of carbon nanotubes water-based nanofluids: Influence of concentration and temperature.* International Journal of Thermal Sciences, 2013. **71**: p. 111-117.

182. Namburu, P.K., et al., *Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture.* Experimental Thermal and Fluid Science, 2007. **32**(2): p. 397-402.

183. Suganthi, K.S., et al., *Influence of nanoparticle concentration on thermo-physical properties of CuO-propylene glycol nanofluids.* Journal of nanoscience and nanotechnology, 2014. **14**(6): p. 4602-4607.

184. Rashin, M.N. and J. Hemalatha, *Viscosity studies on novel copper oxide–coconut oil nanofluid.* Experimental Thermal and Fluid Science, 2013. **48**: p. 67-72.

185. Moghaddam, M.B., et al., *Preparation, characterization, and rheological properties of graphene–glycerol nanofluids.* Chemical engineering journal, 2013. **231**: p. 365-372.

186. Das, S.K., N. Putra, and W. Roetzel, *Pool boiling characteristics of nano-fluids.* International journal of heat and mass transfer, 2003. **46**(5): p. 851-862.

187. He, Y., et al., *Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO2 nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe.* International journal of heat and mass transfer, 2007. **50**(11-12): p. 2272-2281.

188. Pastoriza-Gallego, M.J., et al., *CuO in water nanofluid: influence of particle size and polydispersity on volumetric behaviour and viscosity.* Fluid phase equilibria, 2011. **300**(1-2): p. 188-196.

189. Abareshi, M., et al., *Fabrication, characterization, and measurement of viscosity of α-Fe2O3-glycerol nanofluids.* Journal of Molecular Liquids, 2011. **163**(1): p. 27-32.

190. Turgut, A., et al., *Thermal conductivity and viscosity measurements of water-based TiO 2 nanofluids.* International Journal of Thermophysics, 2009. **30**(4): p. 1213-1226.

191. Einstein, A., *A new determination of molecular dimensions.* Ann. Phys., 1906. **19**: p. 289-306.

192. Brinkman, H., *The viscosity of concentrated suspensions and solutions.* The Journal of Chemical Physics, 1952. **20**(4): p. 571-571.

193. Batchelor, G., *The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles.* Journal of fluid mechanics, 1977. **83**(1): p. 97-117.

194. Nielsen, L.E., *Generalized equation for the elastic moduli of composite materials.* Journal of Applied Physics, 1970. **41**(11): p. 4626-4627.

195. Yiamsawas, T., et al., *Measurement and correlation of the viscosity of water-based Al2O3 and TiO2 nanofluids in high temperatures and comparisons with literature reports.* Journal of dispersion science and technology, 2013. **34**(12): p. 1697-1703.

196. Ghadimi, A. and I.H. Metselaar, *The influence of surfactant and ultrasonic processing on improvement of stability, thermal conductivity and viscosity of titania nanofluid.* Experimental Thermal and Fluid Science, 2013. **51**: p. 1-9.

197. Bahiraei, M., et al., *Using neural network for determination of viscosity in water-TiO 2 nanofluid.* Advances in Mechanical Engineering, 2012. **4**: p. 742680.

198. Tijing, L.D., et al., *An experimental study on the bulk precipitation mechanism of physical water treatment for the mitigation of mineral fouling.* International communications in heat and mass transfer, 2007. **34**(6): p. 673-681.

199. Chen, H., Y. Ding, and C. Tan, *Rheological behaviour of nanofluids.* New journal of physics, 2007. **9**(10): p. 367.

200. Chen, H., et al., *Rheological behaviour of ethylene glycol based titania nanofluids.* Chemical physics letters, 2007. **444**(4-6): p. 333-337.

201. Jarahnejad, M., et al., *Experimental investigation on viscosity of water-based Al 2 O 3 and TiO 2 nanofluids.* Rheologica acta, 2015. **54**(5): p. 411-422.

202. Hamid, K.A., et al., *Effect of temperature on heat transfer coefficient of titanium dioxide in ethylene glycol-based nanofluid.* Journal of Mechanical Engineering and Sciences, 2015. **8**: p. 1367-1375.

203. Teng, T.-P., et al., *Pressure drop of TiO2 nanofluid in circular pipes.* Particuology, 2011. **9**(5): p. 486-491.

204. Sen, S., et al., *Surface modification approach to TiO2 nanofluids with high particle concentration, low viscosity, and electrochemical activity.* ACS applied materials & interfaces, 2015. **7**(37): p. 20538-20547.

205. Pak, B.C. and Y.I. Cho, *Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles.* Experimental Heat Transfer an International Journal, 1998. **11**(2): p. 151-170.

206. Xuan, Y. and W. Roetzel, *Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids.* International Journal of heat and Mass transfer, 2000. **43**(19): p. 3701-3707.

207. Wang, B.-X., L.-P. Zhou, and X.-F. Peng, *Surface and size effects on the specific heat capacity of nanoparticles.* International journal of thermophysics, 2006. **27**(1): p. 139-151.

208. Pradhan, N., et al., *The specific heat and effective thermal conductivity of composites containing single-wall and multi-wall carbon nanotubes.* Nanotechnology, 2009. **20**(24): p. 245705.

209. De Robertis, E., et al., *Application of the modulated temperature differential scanning calorimetry technique for the determination of the specific heat of copper nanofluids.* Applied Thermal Engineering, 2012. **41**: p. 10-17.

210. Tiznobaik, H. and D. Shin, *Enhanced specific heat capacity of high-temperature molten salt-based nanofluids.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013. **57**(2): p. 542-548.

211. Pastoriza-Gallego, M., et al., *A study on stability and thermophysical properties (density and viscosity) of Al 2 O 3 in water nanofluid.* Journal of Applied Physics, 2009. **106**(6): p. 064301.

212. Vajjha, R., D. Das, and B. Mahagaonkar, *Density measurement of different nanofluids and their comparison with theory.* Petroleum Science and Technology, 2009. **27**(6): p. 612-624.

213. Said, Z., A. Kamyar, and R. Saidur. *Experimental investigation on the stability and density of TiO2, Al2O3, SiO2 and TiSiO4*. in *IOP conference series: earth and environmental science*. 2013. IOP Publishing.

214. Ho, C., et al., *Natural convection heat transfer of alumina-water nanofluid in vertical square enclosures: an experimental study.* International Journal of Thermal Sciences, 2010. **49**(8): p. 1345-1353.

215. Ganeshkumar, J., et al., *Experimental study on density, thermal conductivity, specific heat, and viscosity of water-ethylene glycol mixture dispersed with carbon nanotubes.* Thermal Science, 2017. **21**(1 Part A): p. 255-265.

216. Singh, V., S. Sharma, and D.D. Gangacharyulu, *Variation of CuO distilled water based nanofluid properties through Circular Pipe.* Volume, 2015. **3**: p. 414-420.

217. Teng, T.-P. and Y.-H. Hung, *Estimation and experimental study of the density and specific heat for alumina nanofluid.* Journal of Experimental Nanoscience, 2014. **9**(7): p. 707-718.

218. Routbort, J.L., et al., *Pumping power of nanofluids in a flowing system.* Journal of Nanoparticle Research, 2011. **13**(3): p. 931-937.

219. Khanafer, K. and K. Vafai, *A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids.* International journal of heat and mass transfer, 2011. **54**(19-20): p. 4410-4428.

220. Chantrenne, P. and C. Ould-Lahoucine, *Prediction of the thermal conductivity of ZnO nanostructures.* Journal of heat transfer, 2012. **134**(4).

221. Ould-Lahoucine, C. and P. Chantrenne, *Prediction of the thermal conductivity of ZnO nanobelts.* Journal of Applied Physics, 2012. **112**(8): p. 084907.

222. Tawfik, M.M., *Experimental studies of nanofluid thermal conductivity enhancement and applications: A review.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **75**: p. 1239-1253.

223. Gupta, M., et al., *A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **74**: p. 638-670.

224. Xiao, B., Y. Yang, and L. Chen, *Developing a novel form of thermal conductivity of nanofluids with Brownian motion effect by means of fractal geometry.* Powder Technology, 2013. **239**: p. 409-414.

225. He, Y., et al., *Numerical investigation into the convective heat transfer of TiO2 nanofluids flowing through a straight tube under the laminar flow conditions.* Applied Thermal Engineering, 2009. **29**(10): p. 1965-1972.

226. Masuda, H., A. Ebata, and K. Teramae, *Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles. Dispersion of Al2O3, SiO2 and TiO2 ultra-fine particles.* 1993.

227. Abdullah, A.M., et al., *Tailoring the viscosity of water and ethylene glycol based TiO2 nanofluids.* Journal of Molecular Liquids, 2020. **297**: p. 111982.

228. Sundar, L.S., et al., *Empirical and theoretical correlations on viscosity of nanofluids: a review.* Renewable and sustainable energy reviews, 2013. **25**: p. 670-686.

229. Sardarabadi, M., M. Passandideh-Fard, and S.Z. Heris, *Experimental investigation of the effects of silica/water nanofluid on PV/T (photovoltaic thermal units).* Energy, 2014. **66**: p. 264-272.

230. Shah, R.K. and A.L. London, *Laminar flow forced convection heat transfer and flow friction in straight and curved ducts-a summary of analytical solutions*. 1971, Stanford Univ CA Dept of Mechanical Engineering.

231. Duffie, J.A., *WA, Solar Engineering of Thermal Processes.* John Wiley & Sons, Ind., 1991: p. 250-330.

232. Leuenberger, H. and R. Person, *Compilation of radiation shape factors for cylindrical assemblies*. 1954, ELECTRO METALLURGICAL CO NIAGARA FALLS NY.

233. McAdams, W.H., *Heat transmission*. 1954.

234. Cengel, Y.A. and M.A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach 6th Editon (SI Units)*. 2007: The McGraw-Hill Companies, Inc., New York.

235. Mahian, O., et al., *Entropy generation during Al2O3/water nanofluid flow in a solar collector: Effects of tube roughness, nanoparticle size, and different thermophysical models.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014. **78**: p. 64-75.

236. Joshi, A.S. and A. Tiwari, *Energy and exergy efficiencies of a hybrid photovoltaic–thermal (PV/T) air collector.* Renewable Energy, 2007. **32**(13): p. 2223-2241.

237. Gorji, T.B. and A. Ranjbar, *Thermal and exergy optimization of a nanofluid-based direct absorption solar collector.* Renewable Energy, 2017. **106**: p. 274-287.

238. Sardarabadi, M. and M. Passandideh-Fard, *Experimental and numerical study of metal-oxides/water nanofluids as coolant in photovoltaic thermal systems (PVT).* Solar Energy Materials and Solar Cells, 2016. **157**: p. 533-542.

239. Sardarabadi, M., et al., *Experimental investigation of the effects of using metal-oxides/water nanofluids on a photovoltaic thermal system (PVT) from energy and exergy viewpoints.* Energy, 2017. **138**: p. 682-695.

240. Bejan, A. and E. Sciubba, *The optimal spacing of parallel plates cooled by forced convection.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 1992. **35**(12): p. 3259-3264.